

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

NÁVRH PŘÍSTROJE PRO ANALÝZU VZNIKU A ŠÍŘENÍ TRHLIN

DESIGN OF INSTRUMENT FOR THE ANALYSIS OF CRACK INITIATION AND PROPAGATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. STANISLAV ŠUBRT

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PAVEL HOUŠKA, PH.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Stanislav Šubrt

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh přístroje pro analýzu vzniku a šíření trhlin

v anglickém jazyce:

Design of instrument for the analysis of crack initiation and propagation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je návrh zařízení, které detekuje trhliny a jejich geometrii. Pro detekci budou použity potenciálové metody ACPD a DCPD v modifikaci Ing. L. Korce, pro DAQ a pro zpracování dat bude použit mikrořadič. Využití navrženého zařízení se předpokládá pro detekci trhlin v parních rozvodech a pro laboratorní materiálové zkoušky.

Cíle diplomové práce:

1. Seznamte se problematikou potenciálových metod ACPD a DCPD.
2. Řešte problematiku použití přístroje, provozních režimů a uživatelského rozhraní.
3. Navrhněte elektroniku přístroje.
4. Navrhněte strukturu software přístroje.
5. Navržený přístroj zhodnoťte.

Seznam odborné literatury:

- [1] Ruschau, J.J., Donald, J.K.: Special Applications and Advanced Techniques for Crack Size Determination, ASTM International, 1995
- [2] Ďaďo S., Kreidl M.: Senzory a měřicí obvody, Skriptum ČVUT, 1999
- [3] Fraden, J.: Handbook of Modern Sensors, 2004, Springer-Verlag, ISBN 0-378-00750-4
- [4] Dokumentace zvoleného mikrořadiče

Abstrakt

Předmětem této práce je proniknutí do oblasti nedestruktivního testování pomocí potenciálových metod, které se v současné době staly standardem jak při zátěžových a únavových zkouškách, tak i v průmyslovém nasazení. Umožňují spojitá a nedestruktivní měření materiálových vzorků, sloužící k vyhodnocení tloušťek, korozních úbytků, deformací, spektroskopii, detekci a analýze parametrů trhlin. Metody také mohou sloužit k identifikaci materiálů a změn v materiálech.

Ve druhé části se práce zabývá návrhem konstrukčního řešení aparatury využívající potenciálové metody v modifikaci Ing. Ladislava Korce, CSc. pro detekci trhlin v parovodech a produktovodech.

Závěr je věnován měření, experimentům a zhodnocení zkonstruované aparatury.

Abstract

The main goal of this thesis is to get an insight into a field of non-destructive testing using potential drop techniques that have nowadays become the standard not only in the fatigue and loading tests but also in the industry. These methods can serve to non-destructively and continuously measure material specimens, thickness, corrosion losses, deformations, spectroscopy and detection and analysis of crack geometry. They can help to identify materials and measure material changes over time.

The second part of this thesis deals with designing the aperture for detection of cracks in steam and product piping using potential drop technique modified by Ing. Ladislav Korec, CSc.

Last part deals with extensive testing, experimenting and evaluation of the aperture.

Klíčová slova

Potenciálové metody, stejnosměrné potenciálové metody, střídavé potenciálové metody, nedestruktivní testování, detekce a identifikace trhlin, parovody, produktovody, vnitřní trhliny

Keywords

Potential drop techniques, ACPD, alternating current potential drop technique, DCPD, direct current potential drop technique, non-destructive testing, crack detection and identification, steam and product piping, front wall crack, rear wall crack

Bibliografická citace

Šubrt, Stanislav. Návrh přístroje pro analýzu vzniku a šíření trhlin. Brno: Vysoké Učení Technické, Fakulta Strojního Inženýrství, 2014. Vedoucí práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Návrh přístroje pro analýzu vzniku a šíření trhlin vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Houšky, Ph.D. s využitím materiálů uvedených v seznamu použité literatury.

Dne 25. 5. 2014

Bc. Stanislav Šubrt

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu Ing. Pavlu Houškovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a také za jeho drahocenný čas, který mi věnoval při psaní této práce. Děkuji rodině a přátelům za podporu.

Děkuji svému zaměstnavateli firmě Sobriety s.r.o. za možnost pracovat na takto zajímavém projektu a děkuji Ing. Ladislavu Korcovi, CSc. z firmy Techlab s.r.o. za nesčetné množství konzultací a ochotu sdílet se mnou know-how jak z oblastí nedestruktivního testování, tak z oblasti elektroniky a analogových výpočtů.



Obsah

1	Úvod	15
2	Přehled elektromagnetických metod nedestruktivního testování	17
2.1	Metody vířivých proudů	17
2.1.1	Princip	17
2.1.2	Možnosti měření	19
2.1.3	Využití	20
2.2	Střídavé potenciálové metody	20
2.2.1	Princip	20
2.2.2	Možnosti měření	22
2.2.3	Využití	22
2.3	Stejnoseměrné potenciálové metody	22
2.3.1	Princip	22
2.3.2	Využití	25
2.4	Potenciálová metoda dle Ing. Ladislava Korce, CSc.	26
2.4.1	Princip	26
2.4.2	Možnosti metody a elektrodové uspořádání	28
3	Návrh přístroje pro analýzu vzniku a šíření trhlin	31
3.1	Analýza požadavků na funkcionalitu	31
3.2	Provozní režimy a uživatelské rozhraní	32
3.2.1	Režim DC Test	32
3.2.2	Režim DC Crack Detection	33
3.2.3	Režim DC Crack Measurement	34
3.3	Návrh elektroniky	35
3.3.1	Vstupní zesilovač	36
3.3.2	Napájecí zdroj a zdroj konstantního proudu	37
3.3.3	Jednotka volby kanálu	39
3.3.4	Řídicí jednotka	40
3.3.5	Bluetooth modul	43
3.3.6	Vstupní/výstupní konektory	44
3.3.7	Bateriové napájení	46
3.4	Návrh software	46
3.4.1	Volba vývojového prostředí a programátoru	47
3.4.2	Architektura	48
3.5	Konstrukce aparatury	53
3.5.1	Volba konstrukční krabice	53

3.5.2	Uspořádání čelního panelu	53
3.5.3	Uspořádání zadního panelu	54
3.5.4	Vnitřní uspořádání	54
3.5.5	Umístění baterie	55
3.6	Návrh měřicí sondy	55
4	Provozní testy navržené aparatury	57
4.1	Detekce vnitřních trhlin provozního potrubí pomocí přivařených elektrod	57
4.2	Parametr trhliny při měření na potrubí bez vad	60
4.3	Detekce vnitřních trhlin provozního potrubí pomocí ruční sondy	61
4.4	Detekce vnitřních trhlin testovacího potrubí pomocí ruční sondy	65
4.5	Vliv obecného umístění sondy vůči trhlíně	68
4.5.1	Posuv kolmo umístěné sondy kolmo od středu trhliny	68
4.5.2	Posuv paralelně umístěné sondy kolmo od trhliny	69
4.5.3	Natočení sondy	70
4.5.4	Posuv kolmo umístěné sondy po celé délce trhliny	71
4.6	Zhodnocení testů	72
5	Závěr	73

1 Úvod

Technické diagnostice se v současné době dostává stále větší pozornosti. V moderních podnicích s výrazně optimalizovanou výrobou mohou mít neplánované výpadky, poruchy a odstávky zásadní vliv nejen na zvýšení nákladů, ale díky provázanosti jednotlivých podniků i na dobré vztahy s odběrateli. Mezi hlavní cíle technické diagnostiky patří zejména snaha o zjištění a monitorování aktuálního stavu zařízení, snížení provozních nákladů (minimalizace neplánovaných výpadků výroby, efektivnější využití životnosti, využití znalostí o aktuálním stavu zařízení do systému prediktivní a proaktivní údržby) a v neposlední řadě také snaha o ochranu lidských životů a životního prostředí. V praxi se nejčastěji využívá diagnostika provozní, bezdemontážní a nedestruktivní.

Potenciálové metody, které jsou předmětem této práce, prošly v posledním století rychlým a intenzivním vývojem. V současnosti jde o ověřené metody, které se staly standardem pro analýzu trhlin nejen v materiálových vzorcích, ale i v provozech. Umožňují spojitá a nedestruktivní měření materiálových vzorků, sloužící k vyhodnocení tloušťek, korozních úbytků, deformací, spektroskopii, detekci trhlin a analýze jejich parametrů. Metody také mohou sloužit k identifikaci materiálů a změn v materiálech.

Cílem této práce bude proniknout do problematiky potenciálových metod, seznámit se s jejich jednotlivými variantami, představit potenciálovou metodu v modifikaci Ing. Ladislava Korce, CSc., navrhnout zařízení, sloužící pro detekci a analýzu trhlin a následně provést zhodnocení zařízení.

2 Přehled elektromagnetických metod nedestruktivního testování

Hlavním cílem nedestruktivního testování je odhalení vad a poruch sledovaného zařízení, které by mohly ohrozit jeho provoz nebo dokonce vést k havárii, přičemž funkce musí být zachována.

Elektromagnetické potenciálové metody patří do skupiny metod nedestruktivního testování, které jsou velmi atraktivní v různých oborech počínaje energetickým a chemickým průmyslem, konče leteckým a stavebním průmyslem. Vyhodnocené údaje slouží nejčastěji k zajištění bezpečného provozu, minimalizaci nákladů, spojených s odstávkami a odhadu zbývající životnosti sledovaného zařízení. V kontextu potenciálových metod se jedná především o detekci, měření a sledování růstu trhlin, měření tloušťek a korozních úbytků v parovodech a produktovodech a v neposlední řadě o určování materiálu vzorků, případně sledování materiálových změn. Nejnovější metody umožňují měření a sledování plastických deformací a vývoj je směřován také na využití těchto metod ke spektroskopii. [1] [2]

Historicky jsou tyto metody jedněmi z nejstarších metod nedestruktivního testování, jejichž základy postavili počátkem devatenáctého století fyzici Hans Christian Oersted, Michael Faraday, Joseph Henry a Heinrich Lenz, kteří odhalili základní principy elektromagnetismu. Ke skutečnému rozvoji došlo až v roce 1864, kdy slavný fyzik James Maxwell objevil obecný popis elektromagnetického pole (Maxwellovy rovnice). První využití elektromagnetických metod pro nedestruktivní testování proběhlo až v roce 1879. V polovině dvacátého století byly již k dostání první funkční komerční aparatury, avšak k rozšíření metod došlo až v osmdesátých letech dvacátého století v souvislosti s rozvojem elektrotechniky (zejména mikroprocesorů) a uvolněním teoretických poznatků, srozumitelných i bez rozsáhlých znalostí z oboru. [3]

2.1 Metody vířivých proudů

2.1.1 Princip

Pokud je vodivý materiálový vzorek přiblížen ke střídavému elektromagnetickému poli, vytvořeném měřicí cívkou, indukuje se v něm střídavý elektrický proud, jehož magnetické pole působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou (Lenzův zákon). V závislosti na permeabilitě materiálového vzorku pak lze změřit změnu impedance měřicí cívky. Vzniklé vířivé proudy mají následující vlastnosti: [3]

- 1) Tečou v uzavřených a soustředných smyčkách (Obr. 1)
- 2) Jejich orientace je dána orientací měřicí cívky
- 3) Detekce vad v materiálu je možná pouze pokud vada naruší jejich tok (Obr. 2)

- 4) Jejich tok je ovlivněn nevodivými hranicemi vzorku (Obr. 3)
- 5) Maximální hloubka vniku vířivých proudů do materiálu je omezena tzv. skin efektem. Hloubka vniku je počítána dle vztahu

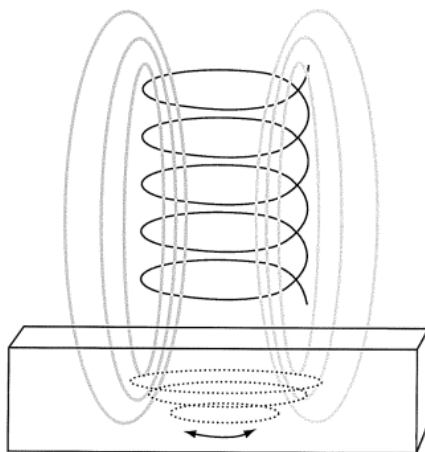
$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu}}$$

Rovnice 1

Vztah pro výpočet hloubky vniku.

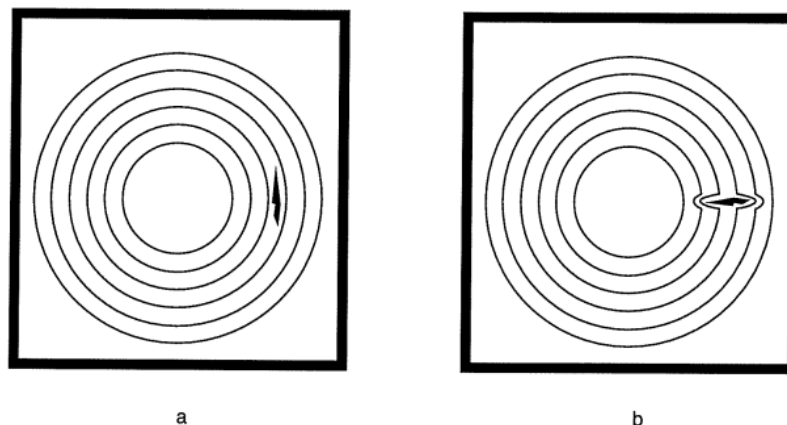
ρ je rezistivita materiálu, f je frekvence proudu a μ je absolutní magnetická permeabilita.

Hloubka vniku δ je definována jako hloubka, ve které klesne hodnota proudu pod 36,8% hodnoty proudu na povrchu. Efektivní hloubka vniku 3δ odpovídá hloubce, kdy klesne hodnota proudu pod 5% hodnoty na povrchu. V této hloubce již narušení toku vířivých proudů nezpůsobí pozorovatelné změny v impedanci měřicí cívky.



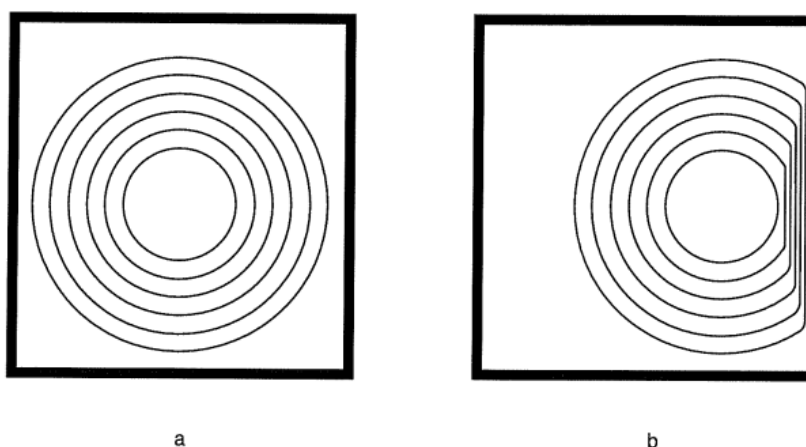
Obr. 1

Znázornění vzniklých vířivých proudů ve vzorku. [3]



Obr. 2

Znázornění vady a) nenarušující b) narušující tok vířivých proudů. [3]



Obr. 3

Znázornění a) nenarušení b) narušení toku vířivých proudů nevodivými hranicemi vzorku. [3]

2.1.2 Možnosti měření

Možnosti měření metodami vířivých proudů jsou primárně omezeny vlastnostmi sledovaného materiálu, měřicí frekvencí, měřicí cívkou a její vzdáleností od povrchu sledovaného materiálu. [3]

- 1) Vodivost – se vzrůstající vodivostí vzrůstá citlivost na povrchové vady, ale klesá hloubka vniku do materiálu.
- 2) Permeabilita – se vzrůstající permeabilitou klesá hloubka vniku do materiálu a zesiluje se šum, způsobený lokálními změnami permeability.
- 3) Frekvence – se vzrůstající frekvencí vzrůstá citlivost na povrchové vady, ale klesá hloubka vniku. U většiny měření je frekvence volena v rozsahu od 50Hz do 10MHz a to dle vzorce pro standardní hloubku průniku (Rovnice 1) a následného jejího následného přizpůsobení na základě předchozího experimentu.
- 4) Vzdálenost cívky – se vzrůstající vzdáleností klesá citlivost měření, ale zároveň klesá i šum, generovaný vibracemi.

- 5) Geometrie cívky – ovlivňuje jak citlivost, tak i schopnost vířivých proudů pronikat do materiálu. Obecně platí, že pro dostatečnou citlivost by průměr měřicí cívky měl odpovídat minimální velikosti hledané vady.

2.1.3 Využití

Díky dlouhému vývoji a vysoké citlivosti metod založených na vířivých proudech bylo objeveno množství možných aplikací: [3]

- 1) Měření tloušťky vzorku
- 2) Měření vzdálenosti mezi vzorkem a cívkou
- 3) Měření tloušťky nevodivého materiálu na vodivém vzorku
- 4) Detekce trhlin a nerovností
- 5) Změny vodivosti a permeability

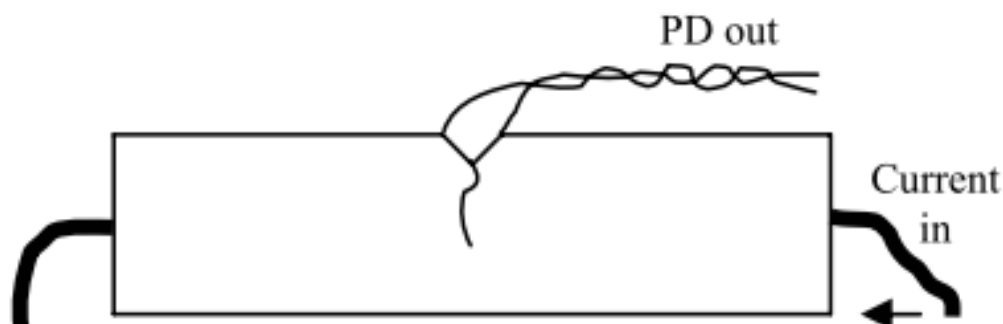
2.2 Střídavé potenciálové metody

Střídavé potenciálové metody jsou po mnoho desetiletí vyvíjené a osvědčené metody sloužící k měření povrchových defektů, trhlin, vyhodnocování materiálových vlastností (vodivost, permeabilita) a určování materiálu vzorku. K hlavním přednostem metod patří nízký měřicí proud, menší velikost aparatury, relativně výrazné měřené signály, teoreticky vyšší citlivost k povrchovým vadám, lineární závislost délky trhliny na měřeném signálu. K nevýhodám patří zejména obtížné měření feromagnetických materiálů a problematika ovlivňování měření přírodními vodiči.

2.2.1 Princip

Základním principem střídavých potenciálových metod (obecně všech potenciálových metod) je zavedení elektrického proudu do sledovaného materiálu a měření vzniklého elektrického pole. V případě známé velikosti vodivosti daného materiálu lze pak posuzovat přítomnost vad, trhlin.

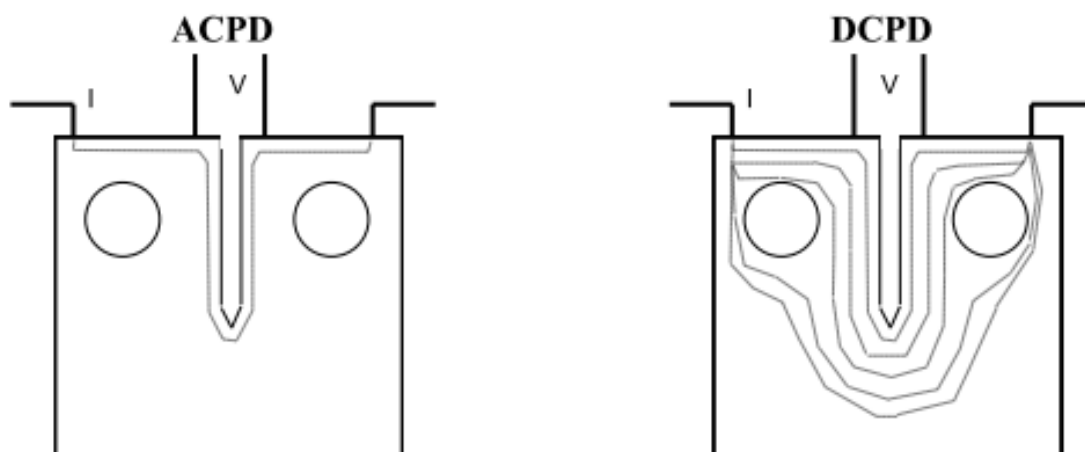
Měření se nejčastěji provádí čtyřbodovou metodou pomocí měřicí sondy nebo přivařením měřicích elektrod na materiálový vzorek bodovou svářečkou (Obr. 4). Krajiní elektrody slouží k zavedení střídavého elektrického proudu a vytvoření elektrického pole. Vnitřní elektrody snímají rozdíl potenciálů na povrchu materiálu.



Obr. 4

Schématické znázornění čtyřbodového připojení elektrod pro potenciálovou metodu. [4]

Základním rozdílem mezi střídavými a stejnosměrnými potenciálovými metodami je fakt, že střídavé metody využívají výše popsaného skin efektu k vymezení hloubky průniku elektrického pole a tím i vymezení efektivního průřezu protékaného elektrickým proudem (Rovnice 1). Vlastností skin efektu se s výhodou využívá pro měření relativně nízkými proudy, které dokáží na malém průřezu vyvolat dostatečně velký rozdíl potenciálů, aniž by hrozilo ovlivnění měření ohřevem materiálu, a pro zvýšení citlivosti na povrchové vady (Obr. 5). Další výhodou skin efektu je lineární závislost mezi velikostí trhliny a změnou specifického odporu materiálu, který může být stanoven například referenčním měřením v místě bez vad. V případě, že je sonda umístěna nad materiálovou vadu, prodlouží se „vzdálenost“, kterou musí proud překonat, což způsobí větší rozdíl potenciálů na měřicích elektrodách (Obr. 5). [5] [6]



Obr. 5

Cesty protékajícího proudu přes trhlinu vlevo) střídavou vpravo) stejnosměrnou potenciálovou metodou. [1]

Měřicí frekvence střídavých potenciálových metod se běžně pohybují v řádech desítek kHz. Při volbě nižších frekvencí je dosaženo větší hloubky průniku vzniklého elektrického pole a tím i možnost detekovat podpovrchové vady. Zároveň klesá citlivost na povrchové vady.

2.2.2 Možnosti měření

Možnosti měření střídavými potenciálovými metodami se primárně odvíjejí od vlivu skin efektu na měřený materiál:

- 1) Vodivost – se vzrůstající vodivostí vzrůstá citlivost na povrchové vady, ale klesá hloubka vniku do materiálu.
- 2) Permeabilita – se vzrůstající permeabilitou klesá hloubka vniku do materiálu
- 3) Frekvence – se vzrůstající frekvencí vzrůstá citlivost na povrchové vady, ale klesá hloubka vniku.

2.2.3 Využití

- 1) Měření geometrie trhlin
- 2) Měření povrchových vad
- 3) Měření vodivosti a permeability vzorku

2.3 Stejnosměrné potenciálové metody

Stejnosměrné potenciálové metody patří k nejstarším, nejpřesnějším a nejčastěji používaným metodám nedestruktivního testování pro detekci iniciace, sledování růstu a měření geometrie trhlin při laboratorních zkouškách i v průmyslu.

Kromě své jednoduchosti a možnosti úplné automatizace mají množství výhod nad ostatními elektro-magnetickými metodami nedestruktivního testování. Nezávislost stejnosměrných potenciálových metod na permeabilitě materiálu umožňuje měřit přesně i feromagnetické materiály, kde střídavé metody i metody vířivých proudů selhávají. K dalším výhodám pak patří jednodušší konstrukce stejnosměrného proudového zdroje, menší náchylnost na indukovaný šum ve vodičích. Naopak k problémům metod patří zejména vysoké používané proudy a s tím související možnost ohřívání vzorku, nelineární kalibrace a chyby způsobené termoelektrickými napětími.

2.3.1 Princip

Základním principem stejnosměrných potenciálových metod je, jako u střídavých, měření napětí na povrchu vzorku protékaného elektrickým proudem a výpočet specifického odporu materiálu.

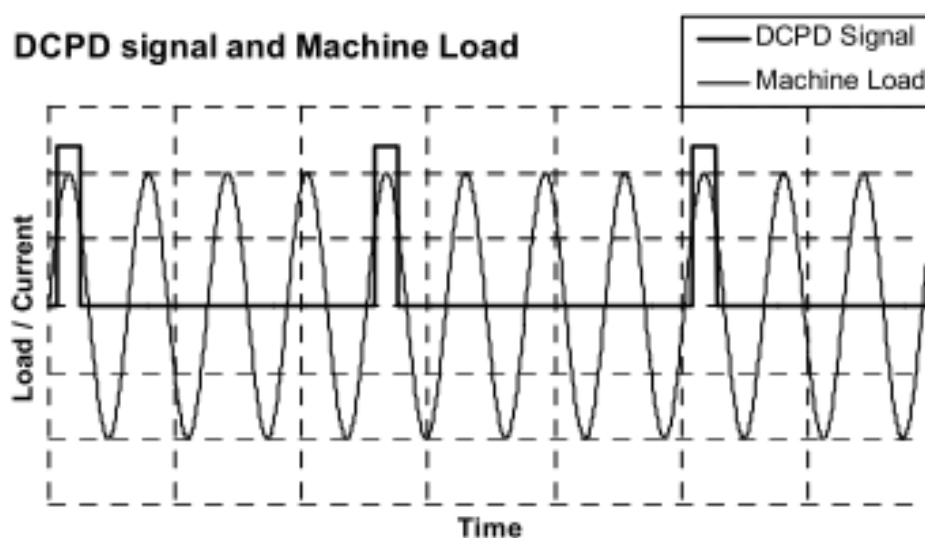
Měření se nejčastěji provádí čtyřbodovou metodou, kdy dvě krajní elektrody slouží pro zavádění proudu do měřeného vzorku a prostřední slouží k měření rozdílu potenciálů na trhlíně. Elektrody mohou být ke vzorku nabodovány (Obr. 4) nebo přiloženy pomocí měřicí sondy. S prodlužující se délkou trhliny se zvětšuje odpor materiálu, neboť se zmenšuje průřez vzorku, a na měřicích elektrodách se zvětšuje rozdíl potenciálů.

Parametry trhlin mohou být vyhodnoceny:

- 1) Na základě experimentálně získaných kalibračních křivek – nejčastěji využívaná metoda. Nevýhodou je nutnost kalibrace proti jinému měřicímu zařízení.
- 2) Metodou konečných prvků

3) Analytický – pouze pro jednoduché geometrie.

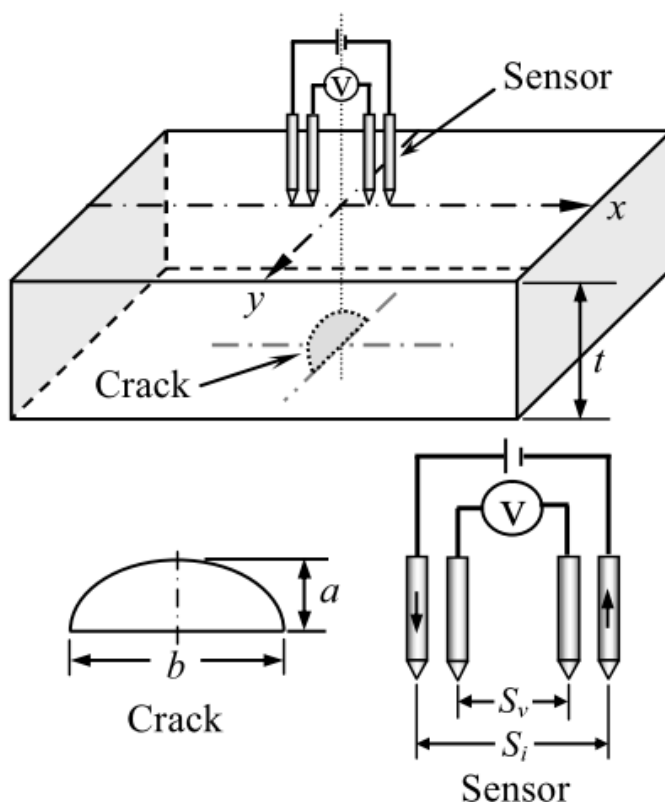
Oproti střídavým se stejnosměrné metody vyznačují výrazně vyššími používanými proudy v řádech desítek ampér. Aby se předešlo nadměrnému a nežádoucímu zahřívání vzorku, provádí se měření pulzně. V pulzním režimu je proud do materiálu zaveden pouze na dobu nezbytně nutnou pro jedno měření, po které následuje relativně dlouhá prodleva před dalším měřením. Při materiálových zkouškách je vhodná synchronizace s testovacím (zatěžovacím) zařízením, aby bylo měření spuštěno přesně v zatěžovacím cyklu, kdy je trhlinka otevřená (Obr. 6). [4]



Obr. 6

Pulzní stejnosměrná metoda synchronizovaná se zatěžovacím cyklem. [4]

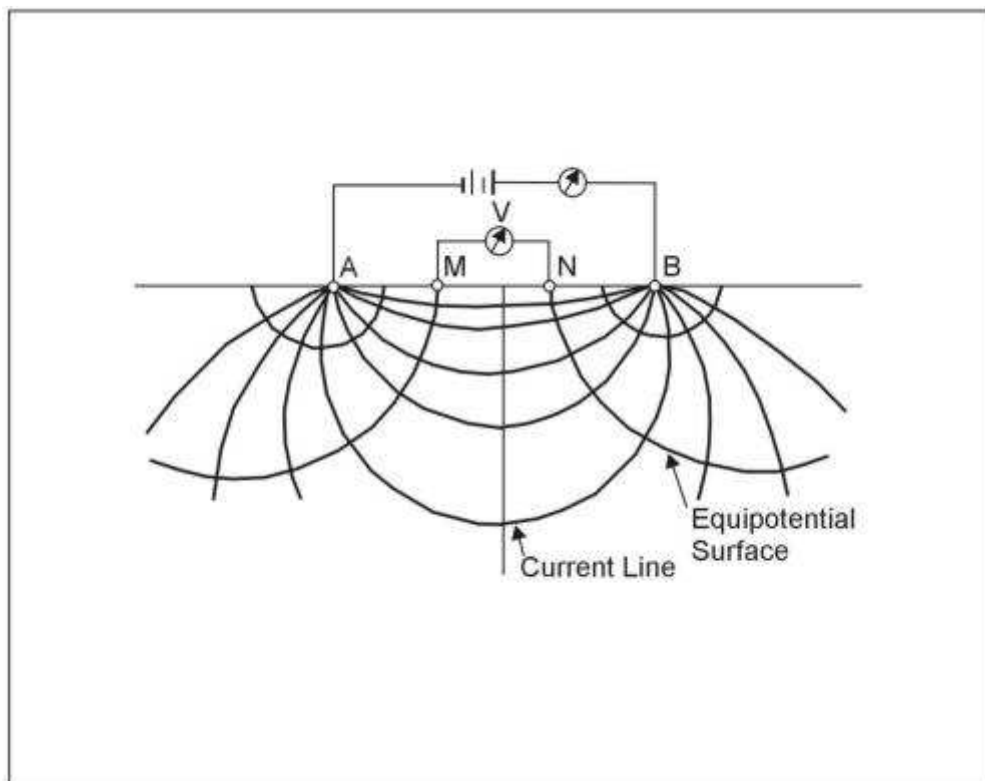
Rozmístění elektrod tak, jak ukazuje (Obr. 4), je vhodné zejména pro sledování iniciace a růstu trhlin v materiálových vzorcích. Pro detekci a měření trhlin v průmyslových aplikacích bylo navrženo nové uspořádání elektrod (Obr. 7) – CCPPD (closely coupled probes potential drop). Bylo dokázáno [7], že toto uspořádání výrazně zlepšuje citlivost i při využití nižších proudů. Dále je toto kompaktní uspořádání výhodnější pro malé ruční měřicí sondy.



Obr. 7

CCPPD uspořádání elektrod pro měření trhlin na odvrácených stranách vzorků. [7]

Stejnosečné potenciálové metody jsou velmi vhodné pro detekci a analýzu trhlin na odvrácené straně zkoumaného materiálu. Na rozdíl od střídavých metod totiž hloubka průniku vzniklého elektrického pole nezávisí na permeabilitě materiálu. To se může v závislosti na použité geometrii měřicí sondy tvořit i hluboko v materiálu. Jelikož hustota elektrického proudu značně klesá s hloubkou (Obr. 8), jsou úbytky napětí ve srovnání se stejnou povrchovou trhlínou také menší. Zejména u tlustostěnných materiálů jsou pak zapotřebí značné měřicí proudy pro dosažení potřebné citlivosti, které naopak při použití měřicích sond mohou způsobovat šum, způsobený přechodovými odpory v místě dotyku.



Obr. 8

Vizualizace proudových a ekvipotenciálových čar v prostorovém elektrickém poli. [8]

Stejnosečné potenciálové metody jsou náchylné k chybám, souvisejícím se vznikem termoelektrických napětí na signálových elektrodách. Za ideálních podmínek, kdy je materiál vzorku i elektrod zcela homogenní a teplota v prostoru měření konstantní a neměnná, se termoelektrická napětí automaticky odečtou. V praxi jsou však materiály nehomogenní, teplota prostředí může kolísat a nemusí být ve všech místech stejná (teplotní gradienty). Řešením problému je do určité míry použití tzv. kvazi-stejnosečného režimu, kdy je nejprve provedeno měření rozdílu potenciálů při zavedeném měřicím proudu, zatížené chybami od termoelektrických napětí, a následně ihned provedeno měření při nulovém měřicím proudu, které změří čistě termoelektrická napětí. Korekce chyby je provedena prostým odečtením těchto dvou hodnot. Problémem stále zůstává měření v prostředí s rychlými změnami teplot. Nevýhodou je i dvojnásobná doba měření, která může být v závislosti na tloušťce a permeabilitě materiálu až několik sekund.

2.3.2 Využití

Stejnosečné potenciálové metody se dle [9] využívají pro následující účely:

- 1) Detekce trhlin – vnějších i vnitřních
- 2) Sledování iniciace a růstu trhlin
- 3) Rozpoznávání materiálů včetně slitin
- 4) Měření tloušťek
- 5) Měření vodivosti – včetně špatně vodivých materiálů jako jsou například polovodiče

- 6) Dle [10] a [8] lze dokonce metody využít i při měření vlastností půdy (hustota, pórovitost, rezistivita), jejich identifikaci a vytváření podpovrchových 2D i 3D profilů půdy.

2.4 Potenciálová metoda dle Ing. Ladislava Korce, CSc.

Potenciálová metoda v modifikaci Ing. Korce [2] od firem Techlab s.r.o. a Sobriety s.r.o. je ve své podstatě kombinací výhod výše uvedených střídavých a stejnosměrných potenciálových metod. Uplatnění nachází zejména při detekci a měření geometrie trhlin, sledování korozních úbytků, měření tloušťek a plastických deformací na parovodech, produktovodech i materiálových vzorcích při zatěžovacích zkouškách.

Z kladných vlastností stejnosměrných potenciálových metod přebírá zejména schopnost měřit i materiály neměřitelné střídavými metodami, dobrou opakovatelnost, možnost měřit hloubkové vady i trhliny na vnitřních stranách potrubí a nezávislost na poloze přírodních vodičů. Z kladných vlastností střídavých potenciálových metod jde především o použití nízkého měřicího proudu (typicky 1A), což umožňuje použití lehčích přírodních vodičů, souvislé měření bez rizika nadměrného přehřívání vzorku, bateriový provoz a s tím související lepší mobilitu aparatury.

2.4.1 Princip

Metoda využívá rozdílných vlastností geometricky odlišných potenciálových polí, formovaných v okolí proudových elektrod. Průběhy elektrického potenciálu $U(x)$ v závislosti na vzdálenosti x od proudové elektrody jsou uvedeny v následujícím výčtu [2]:

- 1) Přímkové – pole je deformováno konečným průměrem materiálu. Vzniká např. ve zkušebních tyčích, potrubí malých průměrů.

$$U(x) = I_M \cdot \frac{\rho}{S} \cdot x$$

Rovnice 2

*Závislost el. potenciálu na vzdálenosti od proudové elektrody v přímkovém elektrickém poli
 I_M je měřicí proud, ρ je měrný odpor materiálu, S je příčný průřez materiálu, x je vzdálenost od napájecí elektrody*

- 2) Rovinné – pole je deformováno konečnou tloušťkou materiálu. Vzniká např. v pláštích nádob a v potrubí větších průměrů.

$$U(x) = I_M \cdot \frac{\rho}{t} \cdot (-\ln x)$$

Rovnice 3

Závislost el. potenciálu na vzdálenosti od proudové elektrody v rovinném elektrickém poli
 I_M je měřicí proud, ρ je měrný odpor materiálu, t je tloušťka materiálu, x je vzdálenost od napájecí elektrody

- 3) Prostorové – pole není ovlivněno konečnými rozměry materiálu. Vzniká především v tlustostěnných nádobách a potrubích.

$$U(x) = I_M \cdot \rho \cdot \frac{1}{x}$$

Rovnice 4

Závislost el. potenciálu na vzdálenosti od proudové elektrody v prostorovém elektrickém poli
 I_M je měřicí proud, ρ je měrný odpor materiálu, x je vzdálenost od napájecí elektrody

Charakteristické průběhy potenciálu mezi dvěma elektrodami vznikají superpozicí polí kladné a záporné elektrody. Průběhy pro jednotlivé tvary potenciálových polí jsou znázorněny na (Obr. 9). Tvar elektrického pole závisí na geometrii sledovaného vzorku a volbě vzdáleností proudových elektrod. Pro prostorové elektrické pole platí, že vzdálenost proudových elektrod a musí být menší než tloušťka materiálu t . [2]

$$a < t$$

Rovnice 5

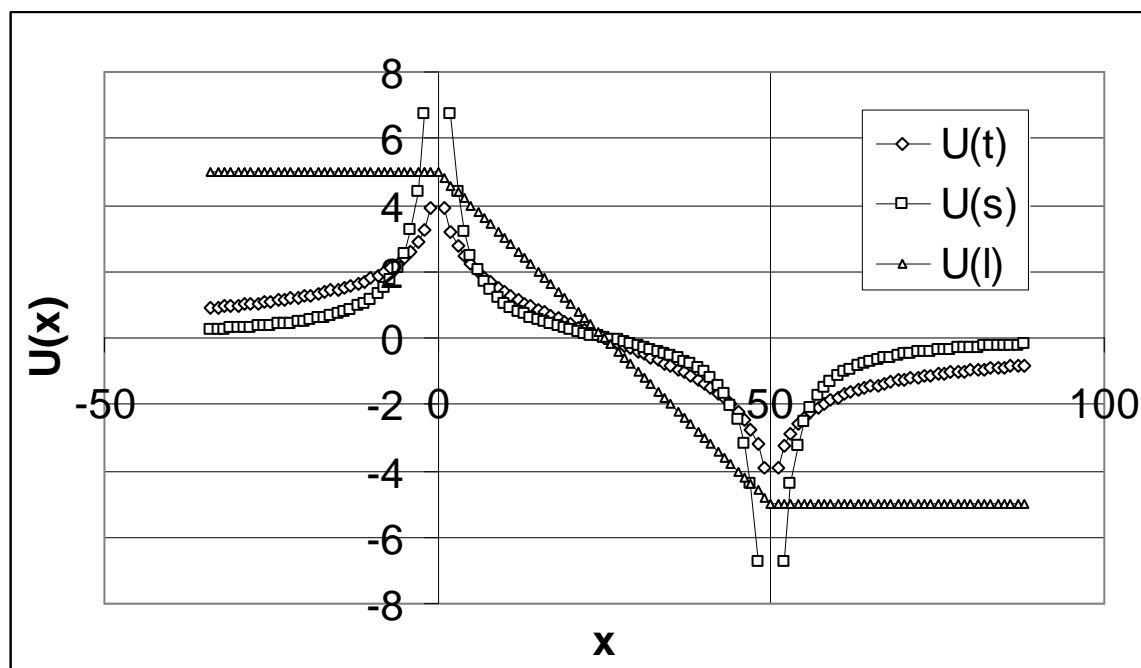
Podmínka vzniku prostorového elektrického pole
 a je vzdálenost proudových elektrod, t je tloušťka materiálu

Pro rovinné elektrické pole platí, že vzdálenost proudových elektrod a musí být větší než trojnásobek tloušťky materiálu t . [2]

$$a > 3 \cdot t$$

Rovnice 6

Podmínka vzniku rovinného elektrického pole
 a je vzdálenost proudových elektrod, t je tloušťka materiálu



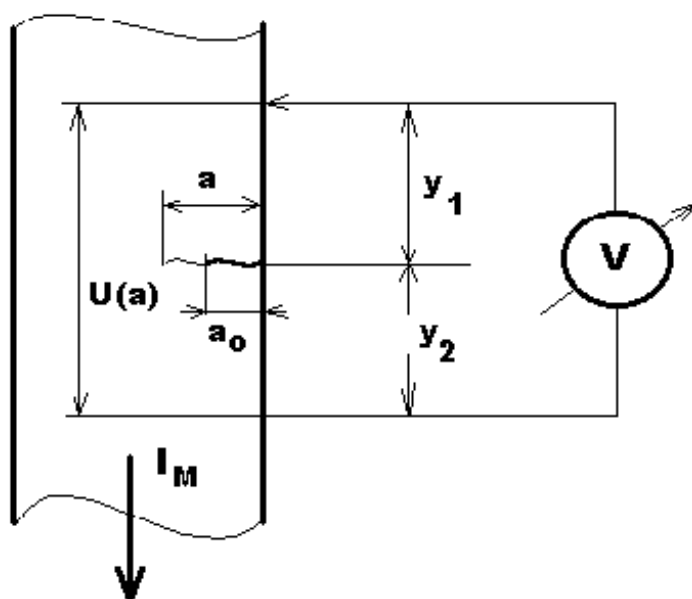
Obr. 9

Zobrazení charakteristických průběhů potenciálů pro jednotlivé tvary potenciálových polí. [2]
 $U(t)$ je průběh rovinného pole, $U(s)$ je průběh prostorového pole a $U(l)$ je průběh přímkového pole.
 Protékaný proud je I_M , $x(0)$ je kladná elektroda a $x(50)$ je záporná elektroda.

2.4.2 Možnosti metody a elektrodové uspořádání

Měření je nejčastěji uspořádáno jako dvojice čtyř-elektrodových systémů, kde vnější elektrody z každého systému slouží pro zavádění měřicího proudu a vnitřní k měření rozdílu potenciálů. Oba systémy jsou umístěny ve stejném místě, ale s různými roztečemi tak, aby jeden formoval prostorové elektrické pole, sloužící k měření specifického odporu materiálu, a druhý plošné elektrické pole, sloužící k měření tloušťky. Výhodou tohoto uspořádání je nezávislost výsledků na aktuální teplotě ani na přesnosti měřicího proudu. Využití nachází především při měření tloušťek a plastických deformací u parovodů a produktovodů. [11]

K dalším možným uspořádáním patří čtyř-elektrodový systém elektrod, sloužící k měření rychlosti šíření trhliny zejména při únavových zkouškách (Obr. 10). Elektrody jsou umístěny symetricky kolem trhliny. Zkušebním vzorkem protéká elektrický proud a v místě trhliny je měřen rozdíl potenciálů. Za předpokladu, že proud je ve vzorku rovnoměrně rozložen a velikost trhliny je mnohem menší než šířka vzorku, lze vyhodnotit rychlost šíření trhliny. [11]



Obr. 10

*Uspořádání čtyř-elektrodivého systému pro měření rychlosti šíření trhliny při únavových zkouškách. [11]
 I_M je měřicí proud, a_0 je počáteční délka trhliny, $U(a)$ je rozdíl potenciálů měřených na trhlíně elektrodami ve vzdálenostech y_1 a y_2 .*

Další možné uspořádání je šesti-elektrodivé uspořádání, které je analogií předchozího zmiňovaného. Slouží pro měření geometrie známých trhlín. Dvojice elektrod slouží k zavedení proudu I_M do materiálového vzorku. Další dvě dvojice jsou symetricky umístěny přes trhlínu, avšak s různými roztečemi y . Na základě měřených rozdílů potenciálů lze vyhodnotit délku trhliny a (Obr. 10). Toto uspořádání se vyznačuje velmi dobrou dlouhodobou stabilitou a potlačením vlivu materiálových vlastností i výkyvů teplot na přesnost měření. [11]

Čtyř-elektrodivé uspořádání CCPPD (Obr. 7) ve formě ruční sondy lze použít pro detekci vnějších i vnitřních trhlín. Vyhodnocení probíhá na základě vztažení jednotlivých měření z oblasti zájmu k referenčnímu měření, provedeném v místě blízkém a bez vad, případně na stejném materiálu bez vad za stejné teploty.

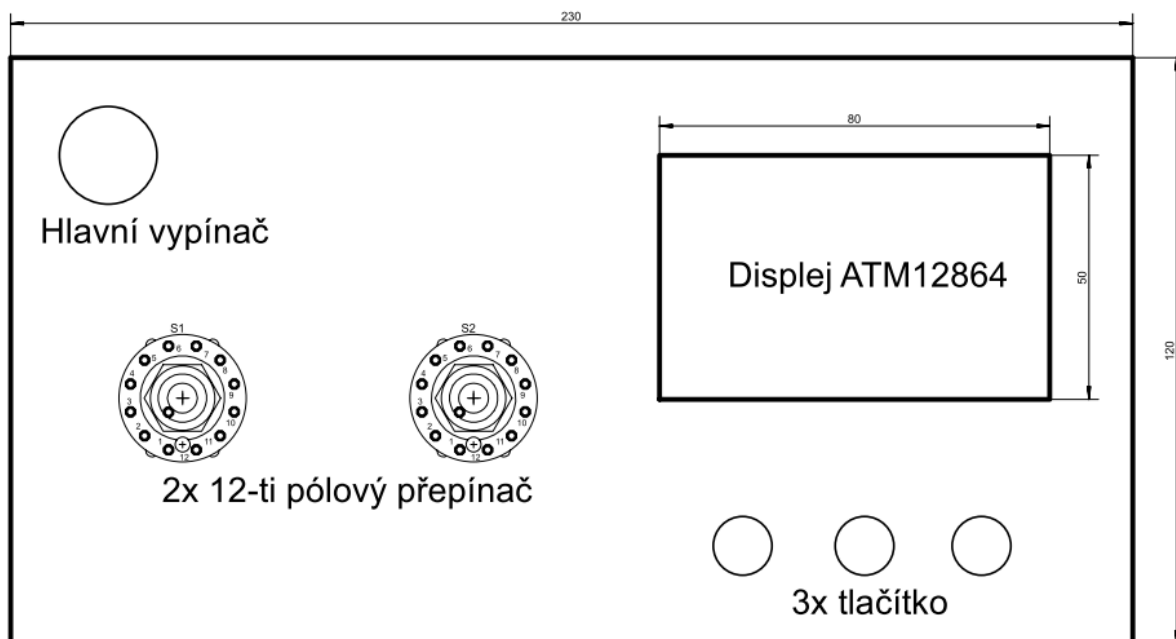
3 Návrh přístroje pro analýzu vzniku a šíření trhlin

3.1 Analýza požadavků na funkcionalitu

Cílem této práce je navržení a realizace přístroje pro analýzu vzniku a šíření trhlin využívajícího k činnosti potenciálovou metodu v modifikaci Ing. Ladislava Korce, CSc. Aparatura by měla být přenosná, bateriově napájená a umožňovat měření jak pomocí ruční sondy, tak pomocí přivařených elektrod. Funkce aparatury jsou následující:

- 1) Detekce trhlin na vnější i vnitřní straně materiálových vzorků
- 2) Analýza geometrie detekovaných trhlin

Ovládání by mělo být řešeno primárně pomocí tlačítek a displeje na čelním panelu. Zároveň by zařízení mělo být připraveno na možnost komunikace s PC. Návrh software pro PC není předmětem této práce.



Obr. 11
Návrh čelního panelu.

Na základě požadovaných funkcí aparatury bylo zvoleno šesti-elektrodové uspořádání měřicí sondy (viz. kapitola 2.4.2 - Možnosti metody a elektrodové uspořádání). Toto uspořádání slouží k měření geometrie známých trhlin. Dvojice vnějších elektrod slouží k zavedení proudu I_M do materiálového vzorku. Další dvě dvojice jsou symetricky v řadě umístěny přes trhlínu s roztečemi y_1 a y_2 . Na základě měřených rozdílů potenciálů lze vyhodnotit délku trhlíny a (Obr. 10). Toto uspořádání se vyznačuje velmi dobrou dlouhodobou stabilitou a potlačením vlivu materiálových vlastností i výkyvů teplot na přesnost měření. [11]

Pro detekci trhlin bude využito čtyř-elektrodové zapojení, přičemž jeden pár elektrod zůstane nevyužit nebo bude sloužit k doplňkovým měřením. Základním úkolem čtyř-elektrodového uspořádání bude vytvářet rovinné elektrické pole v materiálu pod měřicí sondou a měřit rozdíl potenciálů na měřicích elektrodách, který je úměrný specifickému odporu materiálu. Na základě jeho změn bude usuzováno o přítomnosti trhlin.

Základem aparatury budou jednotky vstupního nízko-šumového zesilovače a volby kanálu dle zapojení [11], zapůjčené od firmy Sobriety s.r.o. Aparatura bude řízena řídicí jednotkou s mikrokontrolerem, která se postará o realizaci měřicích cyklů, přepínání měřicích kanálů a komunikaci s PC a displejem. Napájení aparatury bude bateriové, pro maximální mobilitu, a sonda bude připojena dvojicí konektorů typu M12 ve čtyř-pinovém a pěti-pinovém provedení.

Zobrazení bude realizováno pomocí grafického monochromatického LCD displeje WG12864 s rozlišením 128x64px. Pro účely aparatury bude provozován v textovém režimu o osmi řádcích a dvaceti znacích na řádek. Displej bude mít v záhlaví zobrazen v inverzních barvách aktuální měřicí režim a v zápatí budou v inverzních barvách zobrazeny informace o aktuální funkci tlačítek, umístěných na hlavním panelu pod displejem. Zbylá plocha displeje bude využita pro zobrazení dat, specifických pro konkrétní měřicí režim.

3.2 Provozní režimy a uživatelské rozhraní

Měřicí aparatura bude navržena tak, aby byla schopna fungovat v plně automatickém i manuálním režimu. Při manuálním režimu je aparatura ovládána ovládacími prvky na čelním panelu. Tento režim je vhodný zejména při měření s ruční sondou, kdy obsluha hledá trhliny a následně manuálně určuje jejich velikost. V automatickém režimu je aparatura řízena počítačem nebo tabletem s obslužným programem, připojeným bezdrátově pomocí Bluetooth. Tento režim je vhodný především při měření na místech s trvalou instalací měřicích elektrod. Správná činnost obou režimů je podmíněna počátečním nastavením aparatury obsluhou, kdy se pro konkrétní typ materiálu a okolních podmínek nastaví vhodné zesílení a nula pomocí dvou vícepolohových přepínačů na čelním panelu.

3.2.1 Režim DC Test

Jedná se o manuálně ovládaný režim, sloužící k počátečnímu nastavení aparatury obsluhou.

Hlavním problémem měření stejnosměrnými potenciálovými metodami je vznikající termoelektrické napětí na elektrodách, které může v přítomnosti teplotních gradientů v oblasti umístění měřicích elektrod vyvolat i řádově větší odezvu, než měřené elektrické pole. Přestože Korcova metoda principiálně eliminuje vliv termoelektrických napětí na měření, může nastat situace, kdy některé ze vstupních zesilovačů přejdou do saturace, a dojde ke znehodnocení měření. Analogový vstup do řídicí jednotky je nastaven tak, aby v okamžiku možné saturace vstupních zesilovačů přešel do saturace i AD převodník, čímž je dosaženo jednak optimální rozlišitelnosti a vyřešen problém detekce znehodnocených měření.

Režim DC Test provede měření na obou kanálech v DC režimu s oběma polaritami proudu a automaticky detekuje překročení mezních hodnot AD převodníku (jak přetečení, tak podtečení). Na základě vyhodnocení je obsluze navrženo, jakým způsobem je třeba zasáhnout (snížení/zvýšení zesílení aparatury, nastavení nuly).

	a)	b)	c)
	DC Test		
1)	Pol+	Pol-	Sub
2)	+2000	+1000	500
3)	+1000	0	1000
4)	Gain is OK!		
5)	Tune zero!		
	Start		Mode

Obr. 12

Návrh uspořádání obsahu LCD obrazovky v testovacím režimu aparatury.

Pol+, *Pol-* jsou hodnoty napětí změřené na elektrodách (2) = Ch1, 3) = Ch2) pro obě polarity proudu, hodnota *Sub* je hodnota napětí na elektrodách po odečtení termoelektrických napětí.

3.2.2 Režim DC Crack Detection

Manuální režim slouží k indikaci trhlin ve sledovaném objektu a to jak vnějších, tak především vnitřních (skrytých) trhlin. Princip režimu spočívá v provedení měření na sledovaném místě a následně porovnání s měřením, provedeném na referenčním místě. Pokud je vyjádřený poměr větší nebo menší než jedna, byla naměřena změna specifického odporu materiálu, která indikuje trhlínu, ovlivňující rozložení stejnosměrného elektrického pole.

Referenční měření je provedeno stiskem tlačítka Ref při současně umístění sondě na referenčním místě, které by mělo být poblíž místa, kde budou detekovány trhliny. Lze použít i samostatný referenční vzorek, který ale musí být o stejné teplotě, geometrii a ze stejného materiálu.

Vlastní detekce trhlin může být spuštěna tlačítkem start. Dojde ke změření potenciálů na obou kanálech aparatury, využitých při měření trhlin, a následnému vyhodnocení poměru vůči referenčnímu místu. Na základě tohoto poměru je následně usuzováno o přítomnosti trhliny.

	a)	b)	c)
	DC Crack Detection		
1)	Val:	Ref:	Ratio:
2)	+1100	+1000	1.1000
3)	+2200	+2000	1.1000
4)			
5)			
	Start	Ref	Mode

Obr. 13

Návrh uspořádání obsahu LCD obrazovky aparatury v režimu detekce trhlin.

Ve sloupci Ref jsou hodnoty napětí na elektrodách (2) = Ch1, 3) = Ch2) bez termoelektrických napětí z referenčního měření a ve sloupci Val jsou hodnoty z aktuálního měření. Ve sloupci Ratio je vyjádřen poměr $Val(Chx) / Ref(Chx)$.

3.2.3 Režim DC Crack Measurement

V manuálním režimu DC Crack Measurement se provádí měření hloubky trhliny a dle metody [11]. Základem je vyhodnocení napětí U_{Ch1} a U_{Ch2} na elektrodových párech s roztečemi y_{Ch1} a y_{Ch2} , které jsou umístěny symetricky a v jedné linii kolmo k trhlíně. Za předpokladu, že je hloubka trhliny a mnohem menší než tloušťka materiálu t , lze hloubku trhliny vyhodnotit na základě poměru U_{Ch1} a U_{Ch2} dle vztahu uvedeného v [11]. Jedná se o metodu absolutní a není proto provádět žádná referenční měření. Vyhodnocení velikosti trhliny je prováděno automaticky pro ruční měřicí sondu s danými roztečemi. Při využití jiného typu sondy případně přivařených elektrod je nutno velikost trhliny vyhodnotit na základě parametru A , který je zobrazen na zabudovaném displeji. Druhá varianta určení velikosti trhliny využívá kalibračních měření na trhlínách o známých velikostech na stejných materiálových vzorcích.

	a)	b)	c)
	DC Crack Measurement		
1)	Pol+	Pol-	Sub
2)	+2000	+1000	500
3)	+1000	0	1000
4)	A = 2.0000 [-]		
5)	a = 12.34; y1 = 4; y2 = 12 [mm]		
	Start		Mode

Obr. 14

Návrh uspořádání obsahu LCD obrazovky v měřicím režimu aparatury.

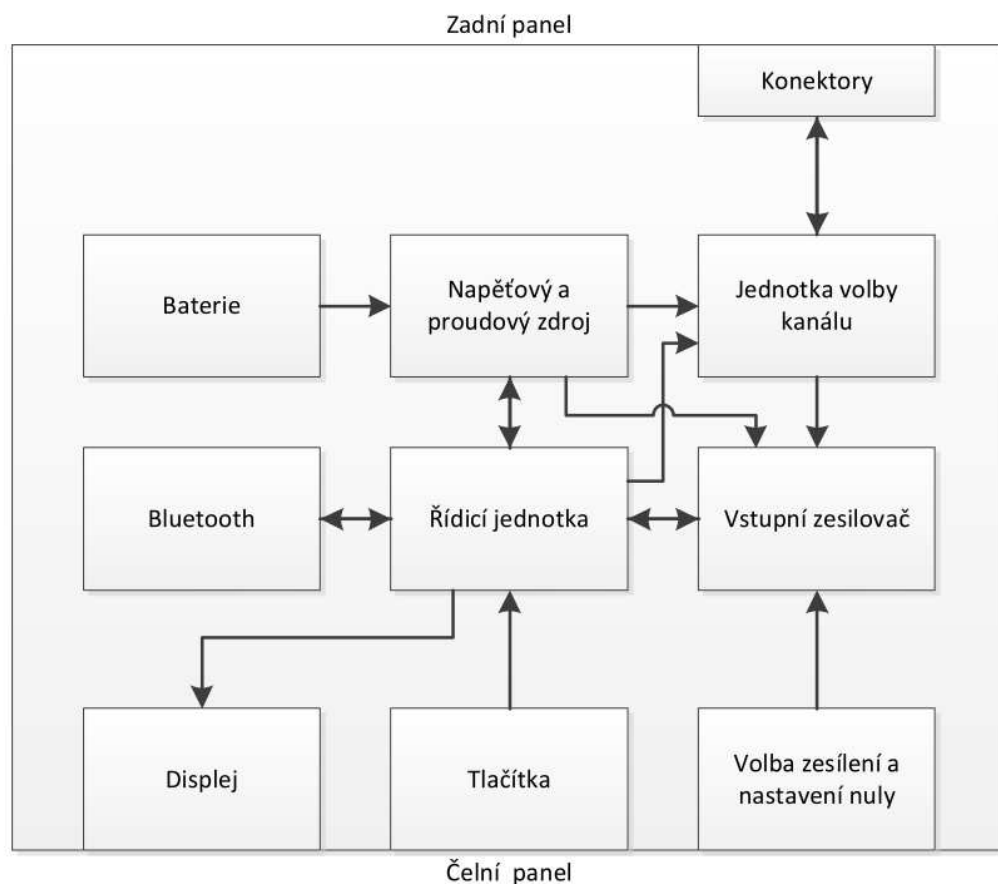
Pol+, Pol- jsou hodnoty napětí změřené na elektrodách pro obě polarity proudu, hodnota Sub je hodnota napětí na elektrodách po odečtení termoelektrických napětí. Hodnota a vyjadřuje délku měřené trhliny a y_n jsou vzdálenosti elektrod, symetricky umístěných přes trhlínu, pro kanály Ch_n .

3.3 Návrh elektroniky

Elektronika aparatury je řešena modulárně (Obr. 15). Jednotlivé funkční celky jsou na samostatných deskách plošných spojů. Důvodem je především flexibilita aparatury a jednodušší vývoj prvních prototypů.

Bateriové napájení je přivedeno do jednotky napětového a proudového zdroje, která se stará o napájení ostatních jednotek. Řídicí jednotka se stará o nastavení jednotky proudového zdroje, jednotky pro volbu kanálu, jednotky vstupního zesilovače a měření výstupního napětí. Dále se řídicí jednotka stará o bezdrátovou komunikaci s PC/tabletem přes Bluetooth modul, zobrazování dat na LCD displeji a reakce na uživatelský vstup z tlačítek na čelním panelu.

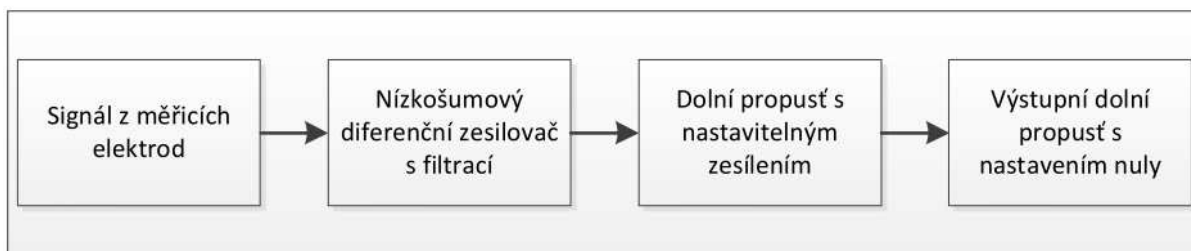
Konektory, připojující vstupní kanály aparatury, jsou přivedeny na jednotku volby kanálu, odkud je vybraný vstup přiveden na jednotku vstupního zesilovače.



Obr. 15
Blokové schéma elektroniky aparatury.

3.3.1 Vstupní zesilovač

Základem aparatury je jednotka vstupního zesilovače, zapůjčená firmou Sobriety s.r.o. Speciální nízkošumový operační zesilovač se zesílením v řádech statisíců nejprve zesílí rozdíl potenciálů, naměřený na měřicích elektrodách. Následuje operační zesilovač v invertujícím zapojení s nastavitelným zesílením (1x, 2x, 4x, 8x, 16x, 32x, 64x, 128x), který je zároveň ve funkci dolní propusti. Zesílený a odfiltrovaný signál je dále filtrován dvojicí dolních propustí, které zároveň umožňují nastavení nuly na výstupu (offsetu). [11]



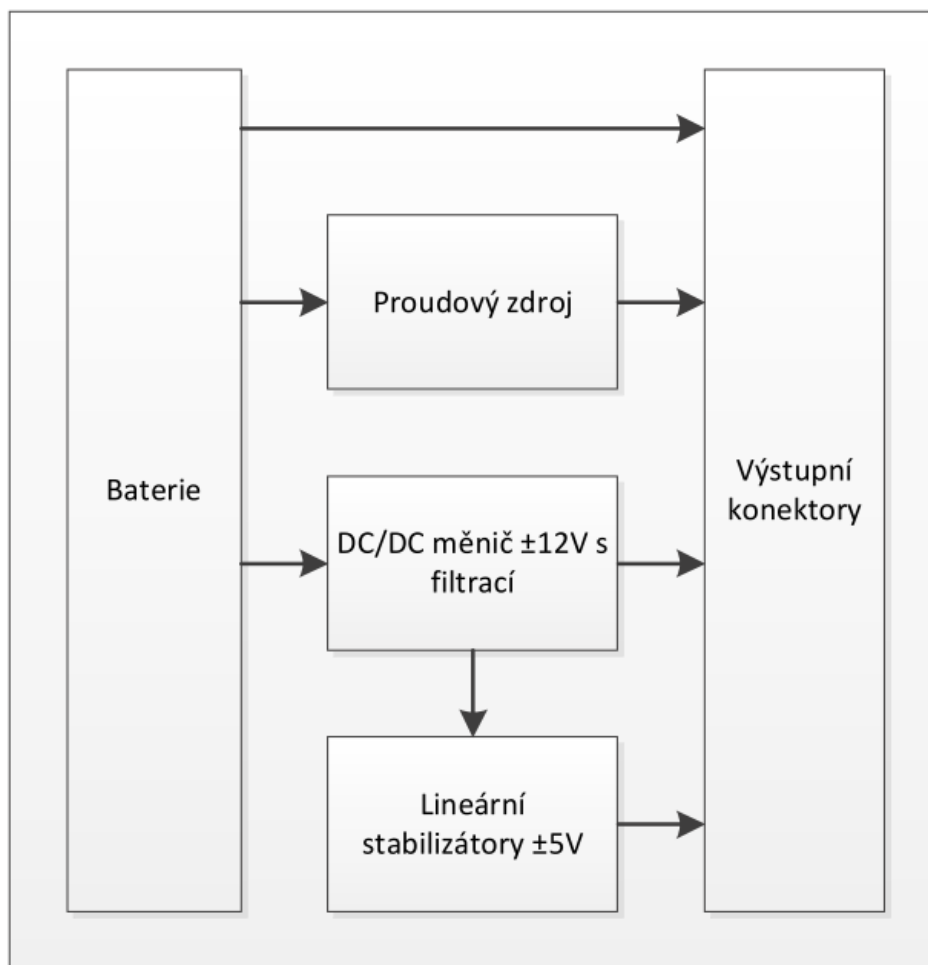
Obr. 16
 Blokové schéma vstupního zesilovače.

Rozhraním jednotky vstupního zesilovače pro připojení k řídicí jednotce jsou dva digitální vstupy pro řídicí signály, a jeden analogový výstup s rozsahem $\pm 12\text{V}$. Napájení je symetrické o velikosti $\pm 12\text{V}$ a $\pm 5\text{V}$.

3.3.2 Napájecí zdroj a zdroj konstantního proudu

Jednotka vstupního zesilovače vyžaduje pro správnou činnost dvojici symetrických napětí o hodnotách $\pm 12\text{V}$ a $\pm 5\text{V}$. Ostatní jednotky jsou napájeny buď přímo z baterie, nebo mají vlastní stabilizátor napětí.

Pro realizaci symetrického napájecího napětí o velikosti $\pm 12\text{V}$ byl zvolen DCDC měnič TEL 3-2022 od společnosti Tracopower s výkonem 3W, který je zapojen, dle katalogového doporučení, s výstupním LC filtrem pro kladnou i zápornou větev. Za měničem jsou zapojeny stabilizátory 78L05 a 79L05, které ze symetrického napětí o velikosti $\pm 12\text{V}$ odvozují napětí $\pm 5\text{V}$. Výstupy se stabilizovaným napětím jsou přivedeny na výstupní konektory jednotky napájecího zdroje.



Obr. 17

Blokové schéma jednotky napájecího zdroje

Proudový zdroj slouží v aparatuře k napájení proudových elektrod. Základem je stabilizační obvod LM317T, zapojený, dle katalogového listu, jako zdroj proudu o velikosti 1A. Ke stabilizátoru je paralelně připojen bypass rezistor, kterým při napájecím napětí 12V protéká proud 545mA a značně snižuje nároky na chlazení stabilizátoru. Výstup ze zdroje proudu je připojen k H-můstku, tvořeném čtveřicí tranzistorů TIP122. H-můstek je ovládán galvanicky odděleným digitálním vstupem a je doplněn o indikaci směru proudu. Výstup z H-můstku je připojen k výstupnímu konektoru.

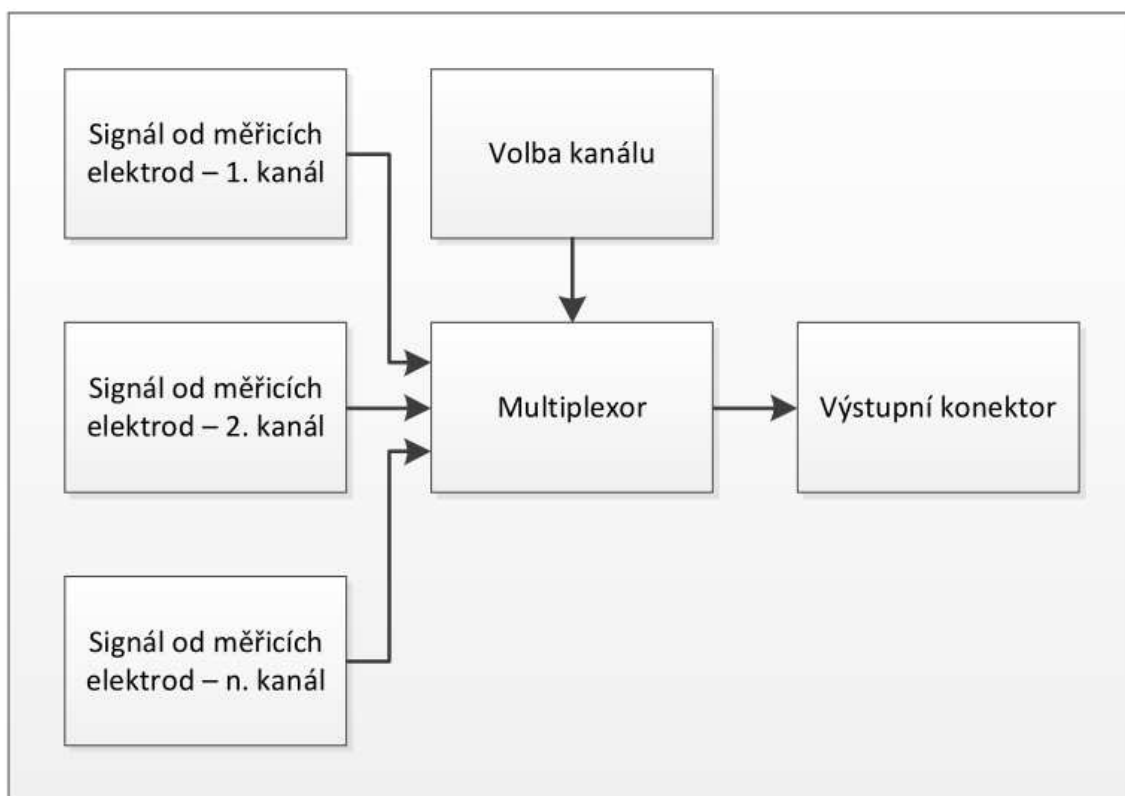
Rozhraním jednotky napájecího zdroje je svorkovnice pro připojení dvanácti-voltové baterie, tři konektory pro napájení ostatních elektronických jednotek a jeden galvanicky oddělený digitální výstup f_M , sloužící k nastavení směru proudu protékajícího proudovými elektrodami.

3.3.3 Jednotka volby kanálu

Jednotka vstupního zesilovače je vybavena pouze jedním vstupem pro elektrodový pár. Hlavním důvodem je, že většina měření prováděných aparaturou je založena na vyhodnocení poměru rozdílů potenciálů na více elektrodových párech. Lze dokázat, že při využití jediného vstupního zesilovače není měření závislé na kalibraci zesílení ani teplotních závislostech vstupního zesilovače (za předpokladu konstantních podmínek v průběhu měření). Malou nevýhodou tohoto řešení je nutnost vybavit aparaturu jednotkou volby kanálu a prodlužující se délka měření (úměrně počtu kanálů). Výhody v tomto případě zásadně převažují nevýhody – celoživotně bezkalibrační provoz aparatury, nižší náklady na výrobu jednotky vstupního zesilovače.

Aparatura je navržena jako čtyř-kanálová (lze připojit až čtyři čtyř-elektrodové systémy). Volba kanálů *Ch1... Ch4* se provádí pomocí čtyř galvanicky oddělených digitálních vstupů (obvod ACPL-246), které přes výstupní budič 40107 přímo spínají relé. Každý elektrodový pár je připojován ke vstupnímu zesilovači nebo proudovému zdroji samostatným relé. Na každý kanál tedy připadají dvě relé.

Vstupně-výstupním rozhraním přepínací desky jsou čtyři digitální vstupy pro volbu měřicího kanálu, napájecí vstup, výstup napětí z měřicích elektrod do zesilovače, vstup měřicího proudu a čtveřice konektorů pro připojení jednotlivých čtyř-elektrodových systémů.



Obr. 18

Blokové schéma jednotky volby kanálu.

3.3.4 Řídicí jednotka

Aparatura je vybavena řídicí jednotkou s mikrokontrolerem STM32F373RCT6, která se stará o řízení měřicích cyklů (volba kanálu, generování řídicích signálů, ukládání naměřených dat) a jejich vyhodnocování, o grafický výstup na LCD displej, reakce na uživatelský vstup a o bezdrátovou komunikaci s PC.

Mikrokontroler STM32F37x byl vybrán na základě dobrých zkušeností s firmou STMicroelectronics a s danou rodinou mikrokontrolerů v rámci firmy Sobriety s.r.o. Zásadním prvkem ve výběru konkrétního modelu byla kvalita integrovaného AD převodníku. Řada STM32F37x nabízí hned tři šestnácti-bitové sigma-delta AD převodníky s rychlostí převodu až sedmnáct tisíc vzorků za sekundu. AD převodník může být navíc napájen odděleným napájecím napětím, čehož je v konstrukci využito pro potlačení vlivu digitálního šumu. Ostatní parametry mikrokontroleru (UART, SPI, dostatek GPIO, čítačů, paměti FLASH a RAM) hravě splňují minimální požadavky pro řízení aparatury.

Peripheral		STM32F373Cx			STM32F373Rx			STM32F373Vx		
Flash (Kbytes)		64	128	256	64	128	256	64	128	256
SRAM (Kbytes)		16	24	32	16	24	32	16	24	32
Timers	General purpose	9 (16-bit) 2 (32 bit)								
	Basic	3 (16-bit)								
Comm. interfaces	SPI/I2S	3								
	I ² C	2								
	USART	3								
	CAN	1								
	USB	1								
GPIOs	Normal I/Os (TC, TTa)	36			52			84		
	5 volts Tolerant I/Os (FT, Ftf)	20			28			45		
12-bit ADCs		1								
16-bit ADCs Sigma- Delta		3								
12-bit DACs outputs		3								
Analog comparator		2								
Capacitive sensing channels		14			17			24		
Max. CPU frequency		72 MHz								
Main operating voltage		2.0 to 3.6 V								
16-bit SDADC operating voltage		2.2 to 3.6 V								
Operating temperature		Ambient operating temperature: −40 to 85 °C / −40 to 105 °C Junction temperature: - -40 to 125 °C								
Packages		LQFP48			LQFP64			LQFP100, UFBGA100 ⁽¹⁾		

Obr. 19
Vlastnosti mikrokontrolerů z rodiny STM32F37x.

Zapojení mikrokontroleru je standardní dle [12]. K mikrokontroleru je připojen 8MHz krystal pro odvození hlavního hodinového signálu 72MHz a dále 32KHz krystal pro obvod hodin reálného času, který je zálohován pomocí baterie typu CR2032. Dále je vyvedeno tlačítko s volbou „boot“ režimu. Pokud je tlačítko stisknuto při resetu, spustí se mikrokontroler ve speciálním režimu, který umožňuje aktualizaci firmware po sériové lince. Ladění a nahrávání firmware je standardně prováděno přes SWD s vyvedeným konektorem.

Jako zobrazovací jednotka je k mikrokontroleru připojen modul monochromatického LCD displeje s rozlišením 128x64px WG12864. Tento modul byl zvolen na základě dobré dostupnosti, nízké ceny, jednoduchosti obsluhy a zástavby do zařízení. Modul je připojen pomocí paralelní sběrnice s osmi datovými a čtyřmi řídicími bity. Řízení jasu je umožněno pomocí trimru na desce řídicí jednotky.

Řídicí jednotka je vybavena vstupem pro tři tlačítka, sloužící k přímé interakci mezi obsluhou a zařízením bez řídicího PC. Každý vstup je standardně chráněn vstupním rezistorem 10KOhm, dvojicí Schottkyho diod BAT54 a kondenzátorem 100nF před možnými vnějšími vlivy. Tento obvod se dále chová jako filtr typu dolní propust' a potlačuje problematické zákmity tlačítek na úrovni hardware.

Jednotky vstupního zesilovače a proudového zdroje vyžadují pro správnou funkci tři řídicí signály SD_1 , SD_2 a f_m , které jsou generovány pomocí mikrokontroleru. Tyto signály slouží k nastavování směru měřicího proudu, generování měřicí frekvence a jsou galvanicky odděleny od mikrokontroleru pomocí obvodu ACPL-247. Řídicí signály jsou vyvedeny na příslušné výstupní konektory.

Připojení jednotky volby měřicího kanálu je realizováno přímo vyvedením pinů mikrokontroleru na výstupní port. Vstupy jednotky volby kanálu jsou galvanicky odděleny.

K řídicí jednotce lze v budoucnu připojit SD kartu, sloužící pro záznam měřených dat. Implementace firmware pro ukládání není předmětem této práce.

AD převodník mikrokontroleru nelze přímo připojit k výstupu vstupního zesilovače z důvodu rozdílných rozsahů. AD převodník pracuje v rozsahu 0V – 3.3V a výstup ze zesilovače je v rozsahu $\pm 12V$. Pro přizpůsobení rozsahu výstupu zesilovače vstupu AD převodníku slouží rezistorová síť, tvořená rezistory R_5 , R_6 a R_7 na (Obr. 20). Pro výpočet vstupního napětí před rezistorovou sítí byl na základě Kirchhoffových zákonů odvozen vzorec (Rovnice 7). Přesná kalibrace není z principu metody nutná, ale je vhodné použít odpory s co nejmenší tepelnou závislostí.

$$V_{in} = \frac{V_{adc} (R_4 R_5 + R_5 R_6 + R_4 R_6) - V_{ref} R_5 R_6}{R_4 R_6}$$

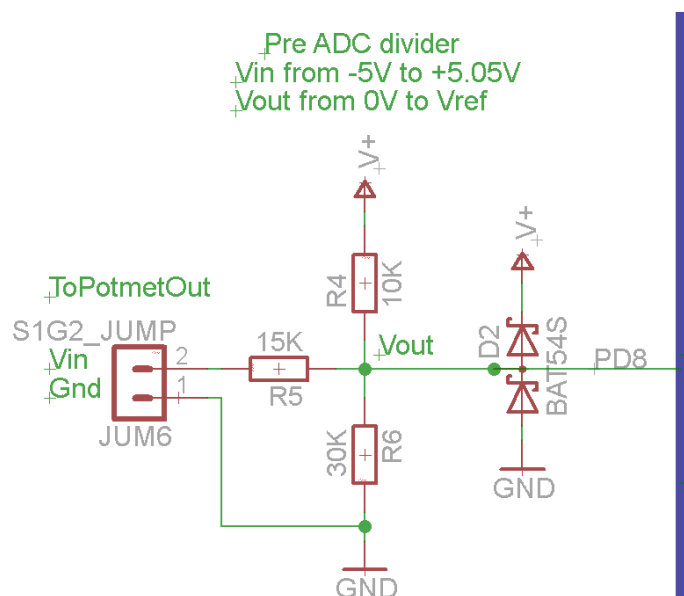
Rovnice 7

Vzorec pro výpočet napětí před rezistorovou sítí (V_{in}) na základě znalosti hodnot rezistorů, napětí na AD převodníku (V_{adc}) a referenčním napětí AD převodníku (V_{ref}).

Na základě provozních zkušeností bylo zjištěno, že pro spolehlivé výsledky měření je nejvhodnější provozovat aparaturu do čtvrtiny maximálního výstupního rozsahu (tzn. přibližně $\pm 3V$). Vstupní impedance AD převodníku je při daném nastavení (1,5MHz) přibližně 500k Ω a je proto vhodné zvolit mnohem nižší impedanci rezistorové sítě nebo doplnit zapojení o výstupní buffer.

Byla zvolena rezistorová síť s následujícími parametry:

- 1) Rozsah vstupního napětí: -5V až +5.05V
- 2) Rozsah výstupního napětí: 0 až 3.3V



Obr. 20

Schéma propojení výstupu ze vstupního zesilovače (JUM6) a AD převodníku (PD8) přes rezistorovou síť, sloužící k přizpůsobení rozsahů.

3.3.5 Bluetooth modul

Pro bezdrátovou komunikaci byl zvolen Bluetooth modul RN41XVC-I/RM od firmy Microchip. Základní parametry splňují požadavky aparatury:

- 1) Napájecí napětí 3V – 6V
- 2) Dosah až 100m na volném prostranství
- 3) Rozhraní UART
- 4) Podpora SPP (serial port profile)
- 5) Nízká cena

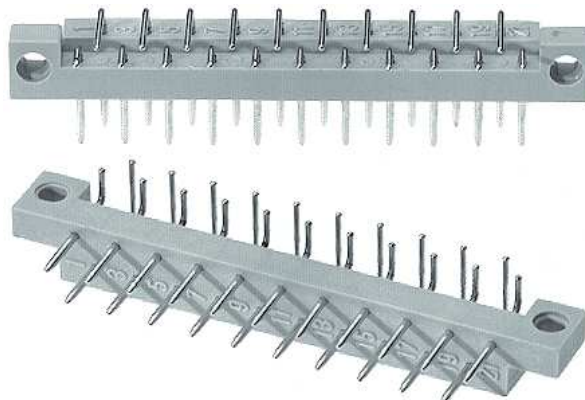


Obr. 21

Bluetooth modul Microchip RN41XVC-I/RM.

3.3.6 Vstupní/výstupní konektory

Volba vhodných konektorů pro připojení jednotlivých čtyř-elektrokových systémů (kanálů) je zásadní zejména z hlediska stability měření v prostředích s vibracemi, nečistotami atd. V prvním prototypu aparatury byl zvolen nožový konektor DIN41.617 (zástrčka) a jako protikus konektor CANNON 20 (zásuvka). V provozu se vyskytly problémy s ovlivněním měření vibracemi a jiným namáháním konektoru.



Obr. 22

Nožový konektor DIN41.617 (zástrčka). [13]

Byla provedena výměna za klasické kulaté průmyslové konektory typu M12 od firmy Amphenol (zásuvky) a Lumberg Automation (zástrčky) v kovovém provedení. Bylo očekáváno zlepšení vlastností při namáhání zejména díky šroubovému spojení a průmyslovému zpracování. Tato kombinace se opět neosvědčila a konektory vykazovaly podobné chování.



Obr. 23

Konektor M12 od firmy Amphenol v pěti-pinovém provedení (zásuvka). [13]



Obr. 24

Konektor M12 od firmy Lumberg Automation v pěti-pinovém provedení (zástrčka). [13]

Finální změnou bylo nahrazení konektorů od firmy Lumberg Automation konektory od firmy Amphenol. Spojení Amphenol-Amphenol se ukázalo jako dostatečně robustní i pro velmi citlivá měření potenciálovými metodami.



Obr. 25

Konektor M12 od firmy Amphenol v pěti-pinovém provedení (zástrčka). [13]

3.3.7 Bateriové napájení

Od aparatury se očekává, že bude provozována po celý den v provozech s parovody a produktovody, které jsou často velice obtížně dostupné a nejbližší zásuvka pro připojení k elektrické síti i desítky až stovky metrů daleko. Z tohoto důvodu bylo zvoleno bateriové napájení. Jako nejvhodnější hotové řešení byla vybrána baterie od firmy TRACER (Obr. 14).

Parametry baterie:

- 1) Napětí 12V
- 2) Kapacita 8Ah
- 3) Typ baterie Li-Pol
- 4) Ukazatel aktuálního stavu nabití
- 5) V balení nabíječka do elektrické sítě 220V a nabíječka do autozásuvky

Baterie s těmito parametry dokáže napájet aparaturu s odběrem $I_{\max} = 1,5A$ po dobu $T_{\text{op}} = 5.3h$ při maximálním využití.



Obr. 26

Vybraná baterie od firmy TRACER. 12V, 8Ah. [14]

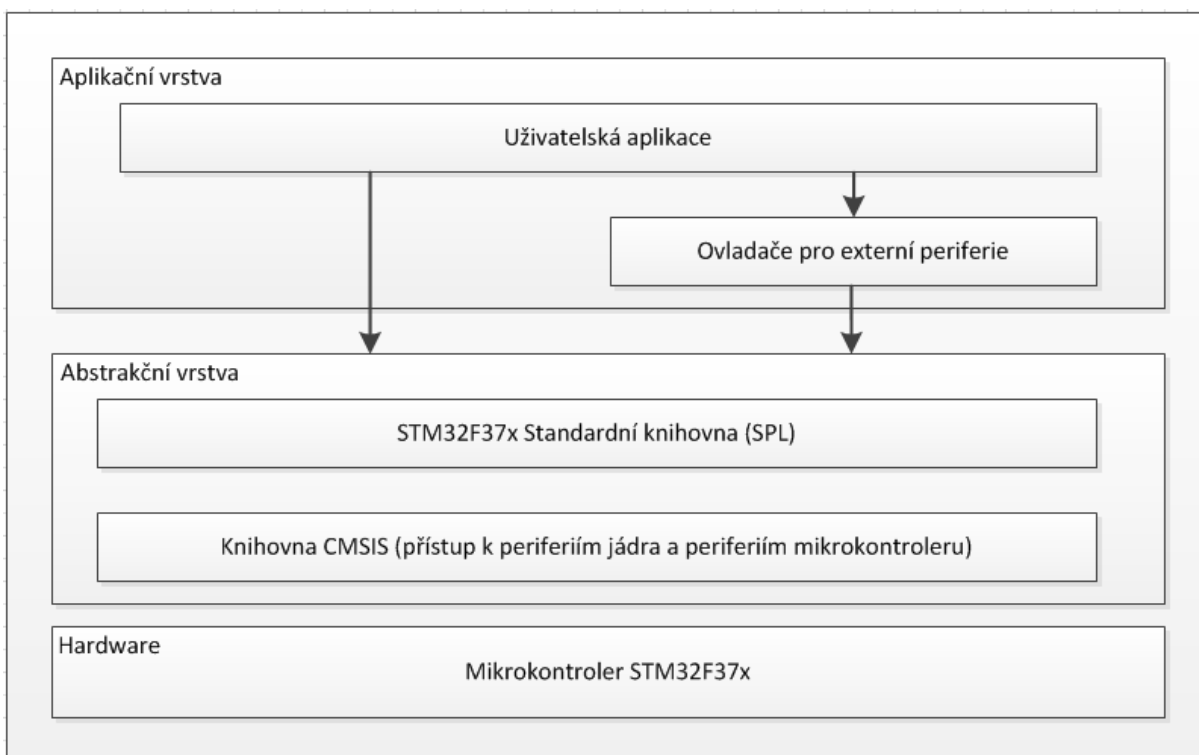
3.4 Návrh software

Úkolem software pro řídicí jednotku s mikrokontrolerem STM32F373 je automatizovat měřicí proces, poskytnout jednoduché uživatelské rozhraní pro operátora aparatury a zajistit komunikaci s PC.

Software je rozdělen do několika modulů, které se dle funkce dají rozdělit do skupin:

- 1) Měření potenciálovou metodou
- 2) Uživatelské rozhraní
- 3) Pomocné funkce
- 4) Knihovny periférií

Pro urychlení a zjednodušení návrhu software jsou využity knihovny od výrobce mikrokontroleru, které poskytují základní abstrakční vrstvu mezi hardware a jeho funkcionalitou (STM32F37x DSP and Standard Peripherals Library - SPL). Jde o soubor ovladačů a příkladů k jednotlivým periferiím. Součástí knihoven je CMSIS DSP Software Library, poskytující množství běžně využívaných funkcí pro zpracování signálů na mikroprocesorech architektury Cortex-M.



Obr. 27

Blokové schéma typické aplikace, využívající standardních knihoven

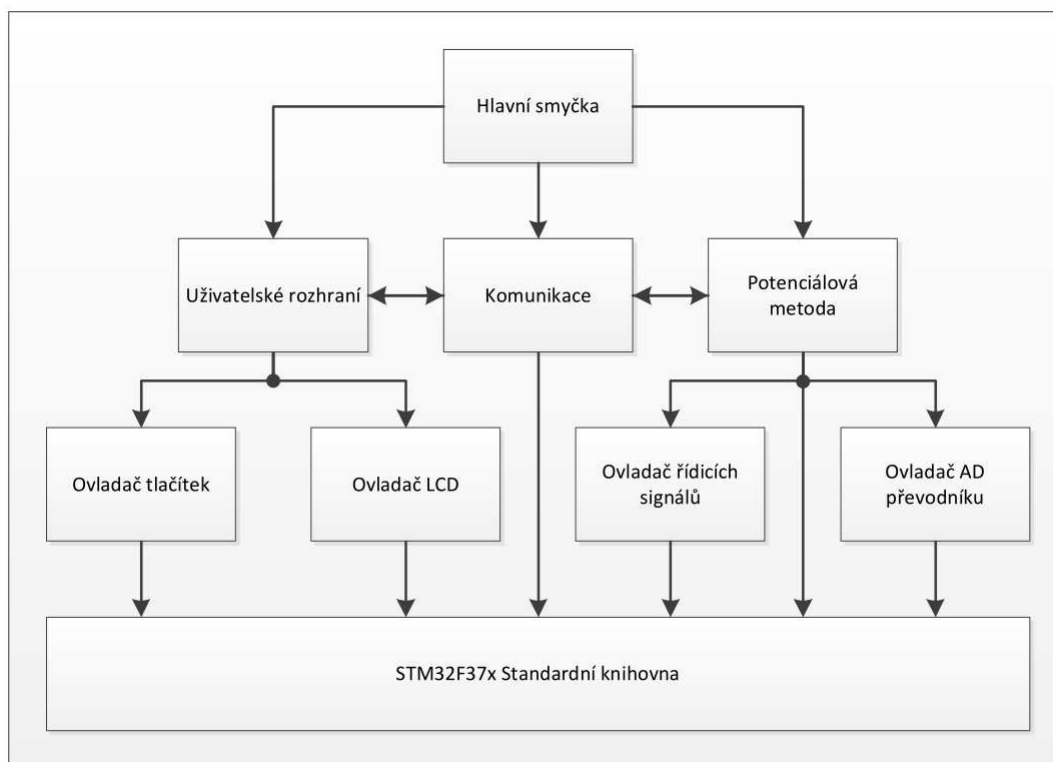
3.4.1 Volba vývojového prostředí a programátoru

Firma STMicroelectronics, jako jedna z mála, nenabízí žádné vlastní řešení vývojového prostředí. Přesto existuje mnoho prostředí, které podporují i její nejnovější rodiny MCU. Z komerčních řešení stojí za zmínku Keil, IAR a CrossWorks. Zdarma existují vývojová prostředí Eclipse, EmIDE, Em::Blocks a mnohá další.

Po dlouhodobém experimentování s výše zmíněnými bylo z favoritů Keil a Em::Blocks vybráno prostředí Em::Blocks, které je zdarma, nabízí přívětivější uživatelské prostředí včetně pokročilých úprav kódu, automatického doplňování, našptávání, integrace dokumentačního software DoxyGen a mnohých dalších funkcí. Je podporováno mnoho programátorů a debuggerů. Pro tuto práci byl mezi J-LINK a ST-LINK V2 programátory zvolen druhý uvedený, který v kombinaci s Em::Blocks umožňuje pohodlnější ladění s možností real-time aktualizace sledovaných proměnných (live updates) a semihosting.

3.4.2 Architektura

Software pro řídicí jednotku je psán modulárně pro co nejjednodušší možnost znovuvyužití funkčních celků kódu. Základní moduly jsou přehledně zobrazeny na (Obr. 28).



Obr. 28

Blokové schéma architektury software.

Časově kritické operace s vysokou prioritou jsou zpracovávány v obsluze přerušení. Naopak běžné operace s nízkou prioritou a případně vysokou náročností na procesorový čas jsou zpracovávány synchronně v hlavní smyčce. Typickými příklady operací s vysokou prioritou jsou čtení hodnot z AD převodníku, odesílání dat po sériové lince a časování měření. V hlavní smyčce je realizována obsluha uživatelského rozhraní a jiných časově nekritických operací.

3.4.2.1 Inicializace MCU a volání main

Pro inicializaci MCU je využito startovacích souborů, dodaných společně s SPL. Jde o soubor *startup_stm32f37x.S*, který v jazyce symbolických adres provádí inicializaci zásobníku, haldy, obsahu paměti RAM včetně vektorů přerušení. Následně je volána funkce *SystemInit*, která konfiguruje jako hlavní zdroj hodinového signálu externí krystal 8MHz násobený PLL na 72MHz, a proveden skok do funkce *main*.

Funkce *main* pokračuje v inicializaci použitých periférií, jednotlivých modulů a konfiguraci přerušení. Po inicializaci přechází do nekonečné smyčky, zajišťující reakce na události uživatelského rozhraní (zpracování žádosti o aktualizaci obsahu displeje, stisknuté tlačítko), Bluetooth modulu (přijetí příkazu) a potenciálové metody (fáze/měření/cyklus ukončen).

3.4.2.2 *Komunikace přes Bluetooth*

Vybraný Bluetooth modul Microchip RN41XVC-I/RM je vybaven rozhraním pro sériovou linku a podporuje SPP (serial port profile). Po spárování s PC je v PC vytvořen virtuální sériový port, přes který probíhá komunikace.

Komunikace je postavena na dvojici kruhových bufferů *RXBuffer* a *TXBuffer*. Při odesílání dat jsou do *TXBufferu* vloženy všechny znaky, které se následně v obsluze přerušení USART periferie asynchronně odešlou. Obdobně jsou všechny přijaté znaky v obsluze přerušení ukládány do *RXBufferu*. Při přijetí speciálního znaku je nastaven příznak.

V hlavní smyčce programu je periodicky volána funkce *comm_HandleReceivedData*, která v případě přijetí speciálního (terminačního) znaku přesune obsah *RXBufferu* do *CmdBufferu*, kde se příkaz vyhodnotí a zpracuje.

3.4.2.3 *Ovladač displeje*

Ke zvolenému modulu LCD displeje bylo nutno nejprve implementovat komunikaci pomocí paralelní sběrnice a některé ze základních funkcí. Jde zejména o inicializaci displeje, povel k zapnutí a vypnutí, dotaz na stav řadiče (busy waiting) a odeslání obrazového bufferu. Pro zajímavost je přiložen (Obr. 29), na kterém jsou shrnuty nízko-úrovňové funkce řadiče. V této práci je využita pouze jednosměrná komunikace s displejem. Obsah je udržován v paměti RAM MCU a při zpracování žádosti o obnovení celý odeslán do RAM displeje. Velikost obrazového bufferu je 1024B (jeden bit na pixel).

INSTRUCTION	RS	RW	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0	FUNCTION
Read Display Date	1	1	Read data								Reads data (DB[7:0]) from display data RAM to the data bus.
Write Display Date	1	0	Write data								Writes data (DB[7:0]) into the DDRAM. After writing instruction, Y address is incremented by 1 automatically
Status Read	0	1	Bus y	0	ON/OFF	Re-set	0	0	0	0	Reads the internal status BUSY 0: Ready 1: In operation ON/OFF 0: Display ON 1: Display OFF RESET 0: Normal 1: Reset
Set Address (Y address)	0	0	0	1	Y address (0~63)						Sets the Y address at the column address counter
Set Display Start Line	0	0	1	1	Display start line (0~63)						Indicates the Display Data RAM displayed at the top of the screen.
Set Address (X address)	0	0	1	0	1	1	1	Page (0~7)			Sets the X address at the X address register.
Display On/off	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0/1	Controls the display ON or OFF. The internal status and the DDRAM data is not affected. 0: OFF, 1: ON

Obr. 29

Nízkoúrovňové funkce LCD modulu dle katalogového listu

K ovladači bylo implementováno také množství funkcí, umožňujících práci s obrazovým bufferem. K základním patří především možnost vymazat obsah, umístit text a invertovat barvy pro zvýraznění.

3.4.2.4 Ovladač tlačítek

Na čelním panelu aparatury je umístěna trojice tlačítek. Každé z tlačítek může mít v různých režimech různé funkce. Ovladač tlačítek je postaven na kruhovém bufferu *PressedButtonQueue*, do kterého se při uvolnění tlačítka přidá jeho ID. Uvolnění tlačítek je detekováno pomocí externích přerušení, namapovaných na příslušné vstupy mikrokontroleru. Výstupem z ovladače tlačítek je funkce *btms_GetPressedID*, která vrací ID prvního stisknutého tlačítka nebo informaci o prázdné frontě. Tato funkce je periodicky volána z hlavní smyčky programu z obsluhy událostí uživatelského rozhraní, kde se pro konkrétní tlačítko a konkrétní režim provede definovaná činnost.

3.4.2.5 Uživatelské rozhraní

Modul uživatelského rozhraní je vystavěn nad ovladači LCD displeje a tlačítek. Rozhraní se skládá z inicializační funkce *gui_Init*, funkce žádosti o obnovení *gui_RequestRefresh* a funkce pro zpracování událostí *gui_HandleRefreshRequests*, která je volána v nekonečné smyčce hlavního programu.

Základem uživatelského rozhraní je pole struktur *ScreenStructTd*, obsahujících informace o jednotlivých obrazovkách, které mohou být na displeji zobrazeny. Ke každé z obrazovek je přiřazen titulek, ukazatel na funkci, obstarávající překreslení obrazovky, a tři struktury *BtnStructTd* s informacemi o aktuální funkci tlačítek na čelním panelu.

Informace o aktuálním stavu uživatelského rozhraní pak nese struktura *DispStructTd*, která obsahuje ukazatel na pole obrazovek, index aktuální obrazovky a příznak, je-li vyžadováno překreslení *IsRefreshNeeded*.

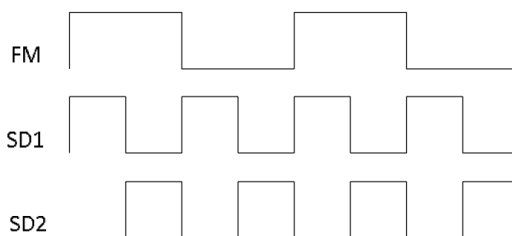
Při každém zpracování žádosti o překreslení se dle *ActiveScreenIndex* vybere struktura aktivní obrazovky *ScreenStructTd* a zavolá její překreslovací funkce, která vykreslí titulek, popisky tlačítek a vlastní obsah obrazovky.

Funkce *gui_HandleRefreshRequests* mimo aktualizaci displeje provádí také čtení stisknutých tlačítek. Pokud bylo stisknuto tlačítko, provede se na základě jeho ID (určuje, které z tlačítek na čelním panelu bylo stisknuto) a *EventID* (určuje aktuální funkci tlačítka dle zobrazené obrazovky) aktuálně přiřazená funkce.

Při současné implementaci existuje teoretická možnost vzniku problému, kdy je stisknuto tlačítko, ale jeho ID zpracováno až v okamžiku, kdy má již přiřazenu jinou událost (*EventID*). Tento stav nastane velmi nepravděpodobně, neboť jsou události zpracovávány s frekvencí v řádech desítek kilohertzů. Přesto je v kódu implementována pojistka, která při změně událostí tlačítek vyčistí jejich frontu.

3.4.2.6 Generování řídicích signálů pro vstupní zesilovač

Pro správnou funkci vstupního zesilovače je třeba generovat řídicí signály SD_1 , SD_2 a f_M , kde f_M je měřicí frekvence pro řízení zdroje proudu a signály SD_x jsou z ní odvozené.



Obr. 30

Znáznornění průběhu řídicích signálů vstupního zesilovače.

f_M je měřicí frekvence, SD_x jsou odvozené signály pro synchronizaci vstupního zesilovače a zdroje proudu.

Generování řídicích signálů je realizováno konečným automatem se čtyřmi stavy, přičemž pro každý stav jsou definovány jejich logické úrovně. Přejchod mezi jednotlivými stavy je zajištěn v obsluze přerušení časovače, nastaveného na čtyřnásobek měřicí frekvence.

3.4.2.7 Realizace měření

Pro realizaci měření slouží modul *potmet*, ve kterém jsou nadefinovány struktury s nastavením jednotlivých typů měření a funkce pro práci s nimi. Jádrem modulu je časovač nastavení na generování periodického přerušení o periodě 1ms. V obsluze přerušení je pak volána funkce *pm_MeasAdvance*, která se stará o veškeré řízení měření na základě struktury s parametry (volba kanálu, měřicí frekvence, polarity, čekací doby, vzorkovací frekvence atd.). K doplňkovým implementovaným funkcím patří zejména funkce pro zjištění aktuálního stavu a celkové délky měření a ukládání dat z měření a manipulace s nimi.

3.4.2.8 Definice hardware

Z důvodu lepší přenositelnosti kódu mezi různým hardware (zejména v rámci rodiny mikrokontrolerů od firmy STM) byly veškeré hardwarové definice umístěny do souboru *main.h*, kde jsou vytvořeny sekce pro příslušné periferie/moduly.

3.5 Konstrukce aparatury



Obr. 31

Fotografie hotové měřicí aparatury.

3.5.1 Volba konstrukční krabice

Elektronika aparatury je umístěna do kovové konstrukční krabice KK12-231 od firmy EZK o rozměrech 234x124x217mm. V zadní části krabice je mřížka, která usnadňuje odvod tepla z chladiče modulu napájecího zdroje.

3.5.2 Uspořádání čelního panelu

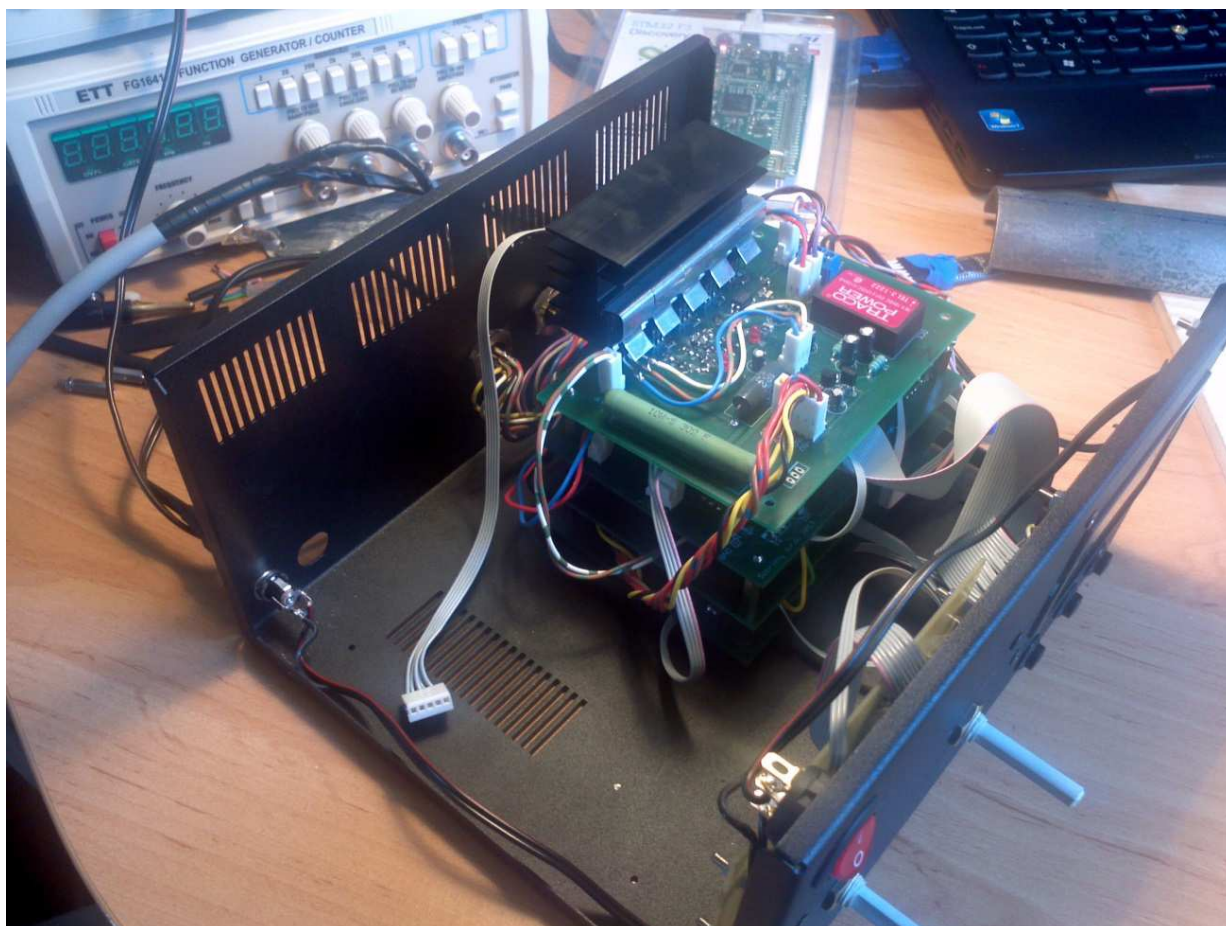
Na čelním panelu aparatury je umístěn hlavní vypínač, dva dvanácti-pólové přepínače, sloužící k nastavení zesílení a nuly, a displej s ovládacími tlačítky (Obr. 11, Obr. 31). Uchycení displeje a dvojice otočných přepínačů je řešeno přišroubováním příslušných plošných spojů přes distanční sloupky. Obrobení čelního panelu realizovala společnost KR-nava s.r.o. na frézce.

3.5.3 Uspořádání zadního panelu

Na zadním panelu je umístěn souosý napájecí konektor typu power jack a trojice výstupních M12 konektorů ve čtyř-pinovém, pěti-pinovém a osmi-pinovém provedení, na kterých jsou dostupné všechny čtyři kanály aparatury. Výhodou použití různých konektorů pro kanály je jejich vzájemná nezaměnitelnost. Problematice konektorů byla věnována kapitola (3.3.6), kde je vysvětleno zvolení více-konektorového řešení. Do budoucna je žádoucí najít dostatečně robustní konektor v nejméně sedmnácti-pinovém provedení, který by za žádných okolností neovlivňoval výsledky měření.

3.5.4 Vnitřní uspořádání

Elektronika byla navržena jako modulární, přičemž jednotlivé moduly mají stejný rozměr i rozteč montážních otvorů. V aparatuře jsou moduly umístěny nad sebe (nejníže vstupní zesilovač, dále volba kanálu, řídicí jednotka a zdroj) a odděleny distančními sloupky. Moduly jsou propojeny konektory PSH od firmy XINYA.



Obr. 32

Vnitřní uspořádání měřicí aparatury.

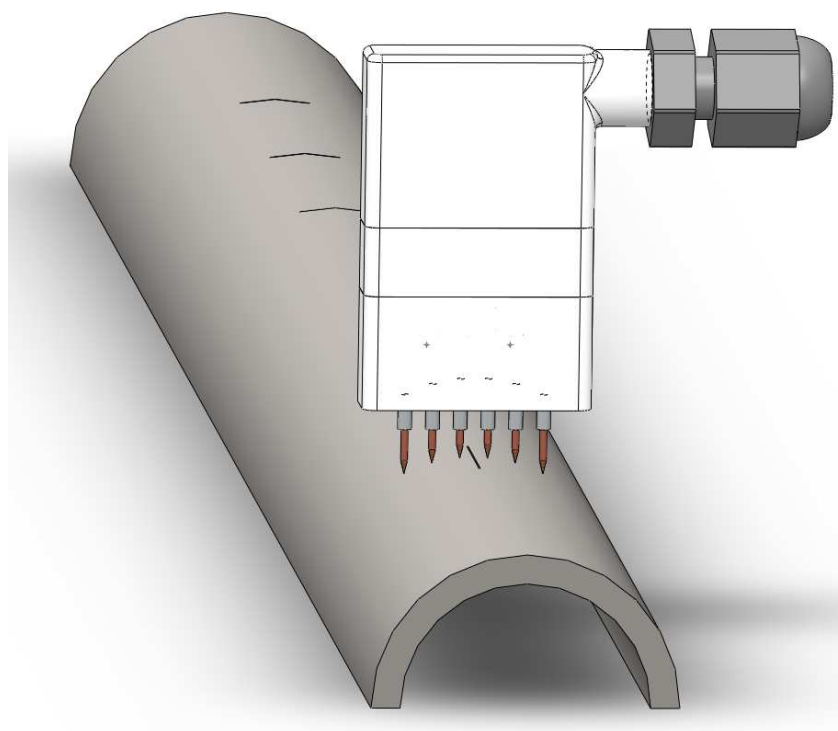
3.5.5 Umístění baterie

Baterie je umístěna na levý bok měřicí aparatury. K připevnění je využito kvalitní 3M lepicí pásky se suchým zipem typu dual-lock, dodané firmou G3. Důvodem k umístění baterie mimo krabičku byl zejména požadavek na snadnou výměnu vybité baterie za nabitou.

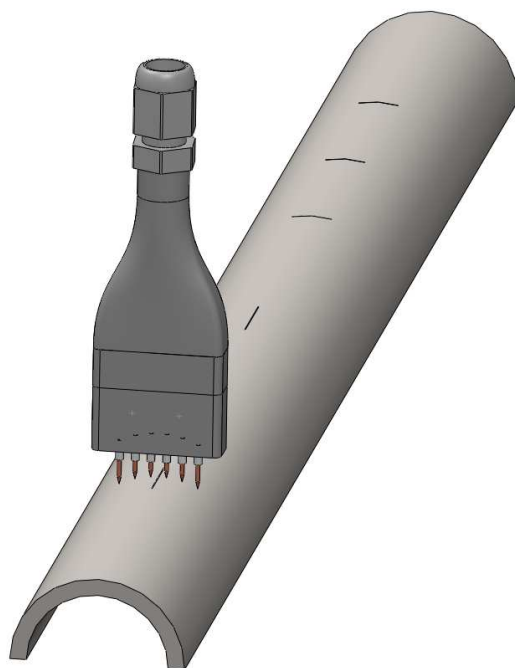
3.6 Návrh měřicí sondy

Měřicí sonda, navržená a zapůjčená firmou Sobriety s.r.o., je realizována jako ruční zařízení se systémem šesti elektrod. Elektrody jsou odpružené a umožňují zasunutí přibližně jeden centimetr. Sonda je k aparatuře připojována pomocí průmyslového osmi-žilového kabelu 4X2X0,34 AWG22 od firmy HELUKABEL s konektory typu M12 – zástrčka.

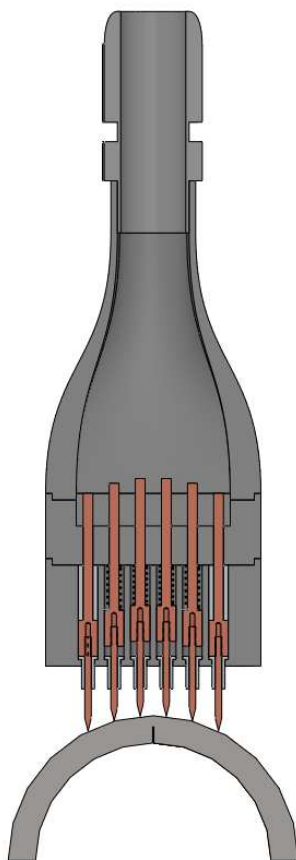
První varianta sondy byla navržena s úhlovým výstupem kabelu, ale vzhledem k nutnosti úchopu relativně blízko k měřicím elektrodám, což by mohlo vlivem termoelektrických napětí ovlivnit přesnost měření, byla navržena druhá varianta, která tento problém řeší.



Obr. 33
První návrh měřicí sondy.



Obr. 34
Druhý návrh měřicí sondy.



Obr. 35
Detail řešení odpružených měřicích elektrod.

4 Provozní testy navržené aparatury

Byla provedena série experimentů a měření s cílem ověřit funkci a zhodnotit možnosti detekce a měření trhlin pomocí navržené aparatury. Měření byla prováděna na různých typech potrubí, zapůjčených firmami Sobriety s.r.o., Techlab s.r.o. a Oddělením technické kontroly a diagnostiky firmy ČEZ a.s.

4.1 Detekce vnitřních trhlin provozního potrubí pomocí přivařených elektrod

Měření bylo provedeno na potrubí se známou trhlinou, pocházejícího z tepelného výměníku, ve kterém ve zvláštních situacích dochází ke kondenzaci kyseliny sírové. V oblasti bodové koroze, vznikající na základě působení této kyseliny, se zpravidla začne šířit trhlina, jak je vidět na testovacím vzorku (Obr. 37).

Měření bylo provedeno na čtyřech místech:

- 1) Místo 1 – počátky bodové koroze
- 2) Místo 2 – v blízkosti je bodová koroze, ale přímo pod elektrodami je materiál bez vad
- 3) Místo 3 – hluboká bodová koroze propojená trhlinou
- 4) Místo 4 – bez vad, ale v blízkosti trhliny od místa 3

Ke každému místu byla bodovou svářečkou přivařena šestice niklových elektrod, která nahradila měřicí sondu (ve výrobě).



Obr. 36
Navařené elektrody k testovacímu potrubí.

Pro měření trhlin Korcovou potenciálovou metodou je zásadním údajem parametr trhliny A , který se vypočítá jako podíl napětí na měřicích elektrodách (Rovnice 8) a který je úměrný hloubce trhliny. Toto platí pouze pro dostatečně dlouhé trhliny, jejichž hloubka je mnohem menší než tloušťka materiálu. Dalším předpokladem je vhodné rozmístění měřicích elektrod, které musí být umístěny symetricky k trhlině.

$$A = \frac{U_{Ch1}}{U_{Ch2}}$$

Rovnice 8

Vztah pro výpočet parametru trhliny A.

Z tabulky s výsledky měření lze vyčíst jasnou závislost velikosti parametru trhliny A na stavu měřeného místa a to s opačným trendem, než při měření povrchových trhlín. Na základě pozdějších experimentů a ověření bylo zjištěno, že umístění elektrod při tomto měření nebylo přesně symetricky k trhlíně, ale vnitřní měřicí elektrodový pár (1. kanál) byl na jedné straně trhliny. Při takovém umístění nelze Korcův vztah pro výpočet hloubky trhliny použít a parametr trhliny A slouží pouze k její detekci.

Místa bez známých vad mají parametr A o velikosti 0,31 – 0,32. U místa s bodovou korozí A klesá na hodnotu 0,28 a u místa s již rozšířenou trhlínou až na 0,05. Zajímavé jsou také hodnoty napětí na měřicích elektrodách. Zdá se, že vnitřní měřicí elektrodový pár (Ch1) je citlivý pouze na trhliny, zatímco vnější měřicí elektrodový pár (Ch2) indikuje i počátky bodové koroze.

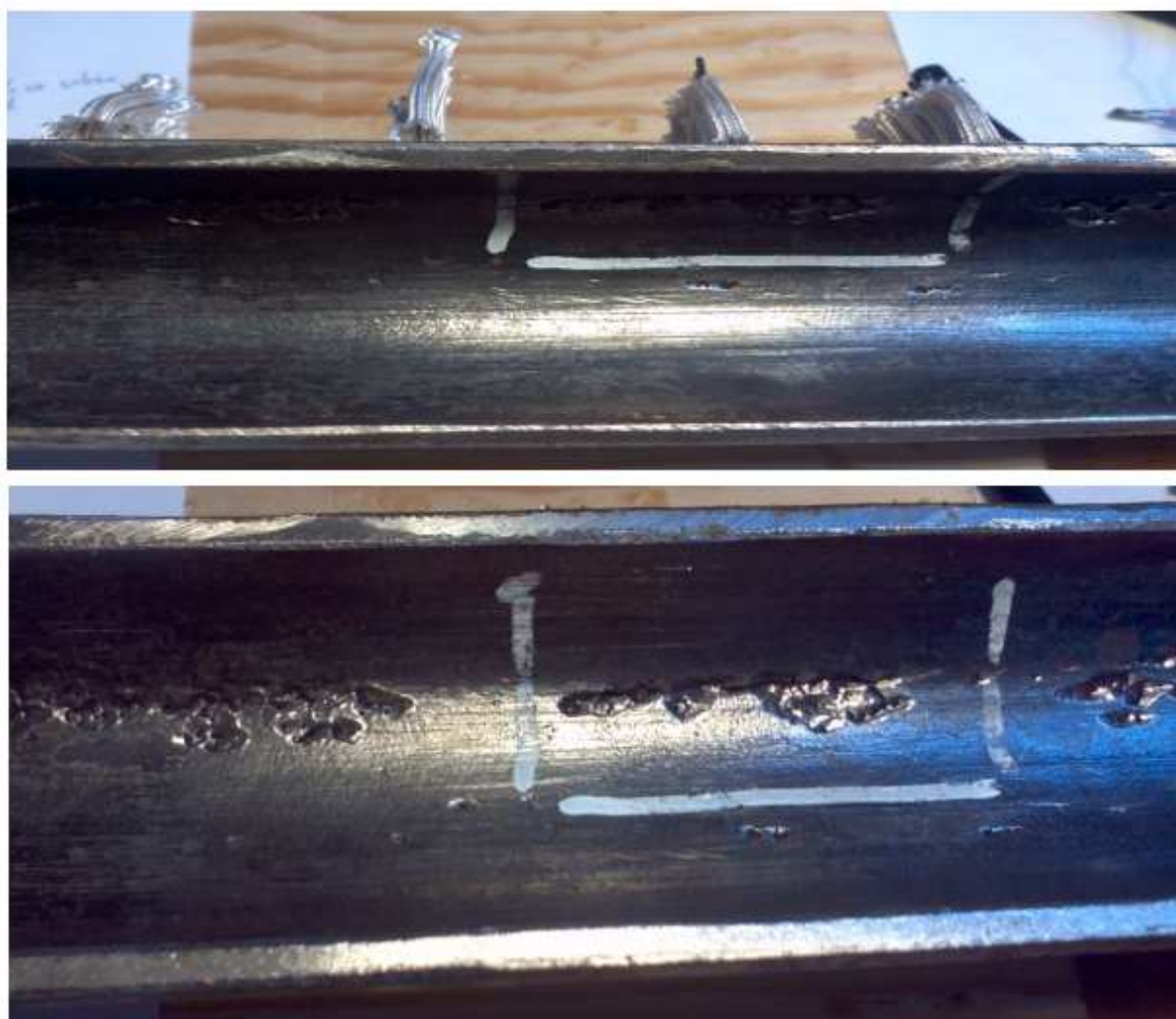
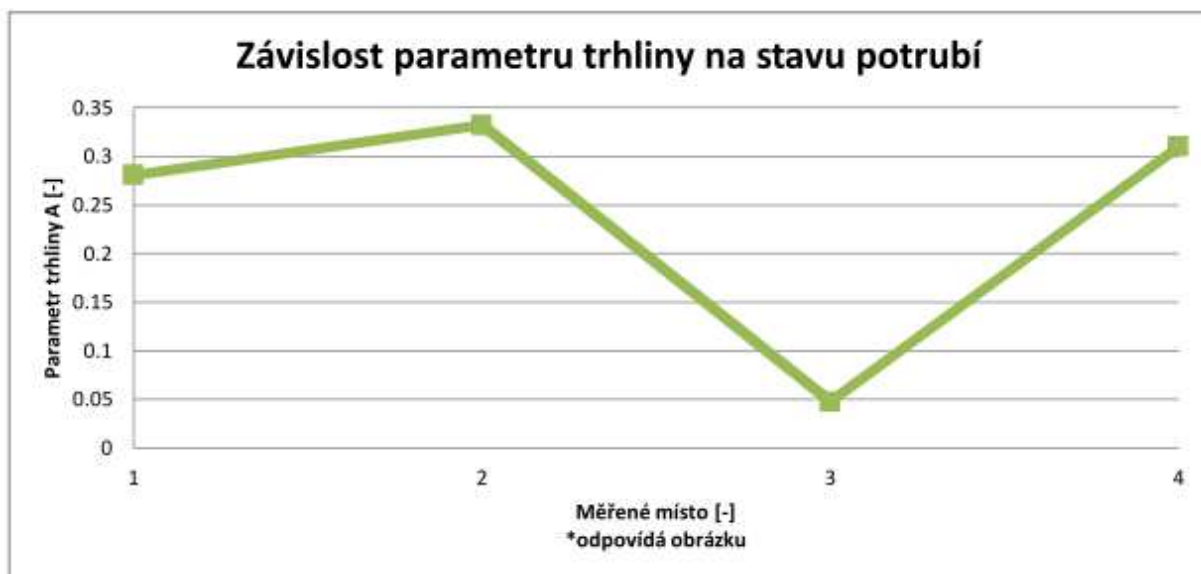
Vliv vnitřních trhlín na parametr A a jednotlivá napětí, měřená na elektrodách, bude předmětem dalšího bádání. Indikace přítomnosti trhliny je naprosto zřetelná.

	$U_{Ch1}[mV]$	$U_{Ch2}[mV]$	$A[-]$	U_{Ch1}/U_{Ref}	U_{Ch2}/U_{Ref}	A/Ref
Místo 1	357.8	1275.3	0.280	1.009	1.195	0.844
Místo 2	354.3	1066.4	0.332	1	1	1
Místo 3	85.2	1791.8	0.047	0.240	1.680	0.143
Místo 4	353.4	1139.4	0.310	0.997	1.068	0.933

Tabulka 1

Výsledky z měření na testovacím potrubí.

Hodnoty parametru trhliny A pro jednotlivá měřená místa byly vyneseny do grafu. Pro lepší ilustraci jsou pod grafem umístěny obrázky z měřené trubky, které odpovídají ose X grafu.



Obr. 37
Výsledky z testování režimu detekce trhlín aparatury.
Osa X odpovídá přiloženým obrázkům.

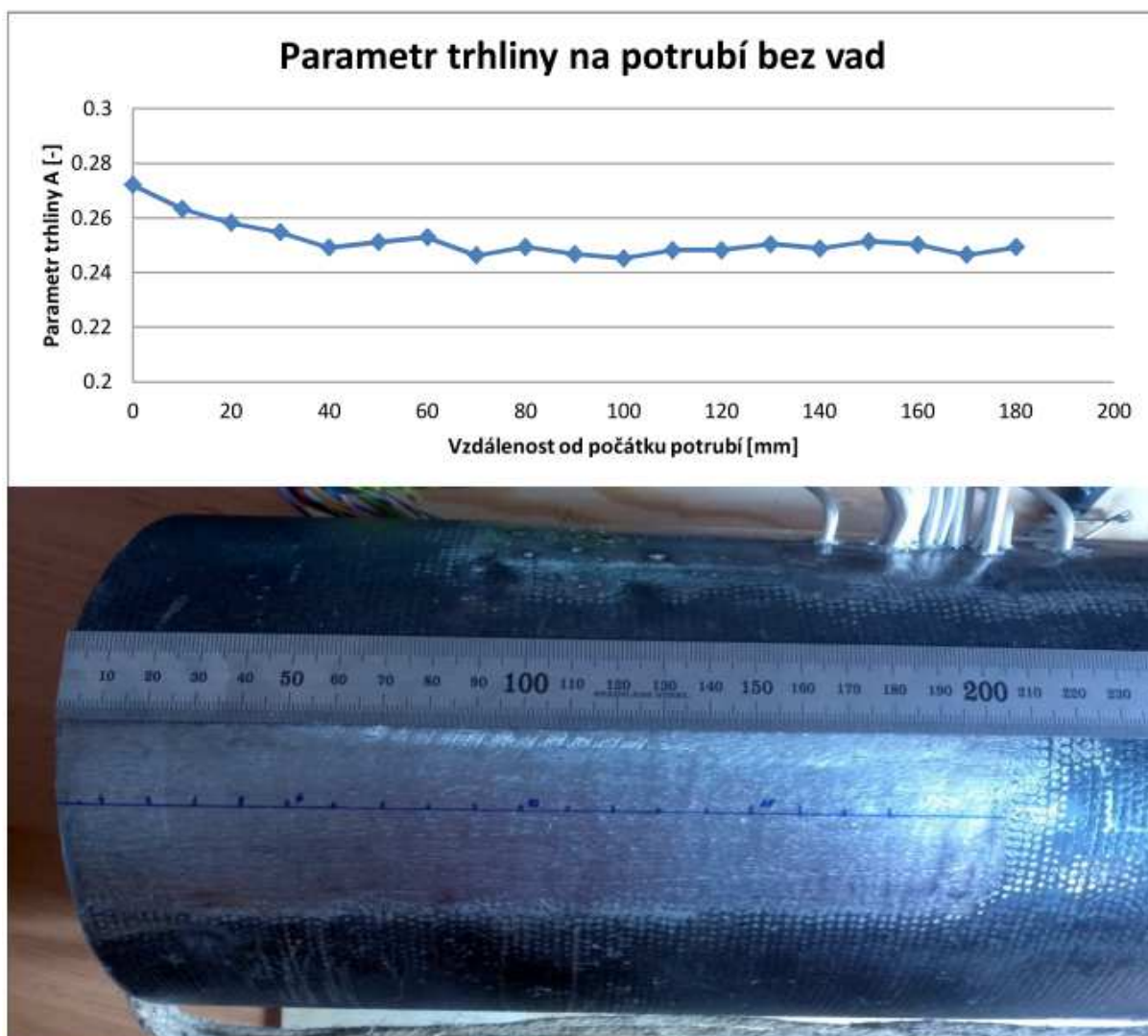
4.2 Parametr trhliny při měření na potrubí bez vad

Měření bylo provedeno na testovacím potrubí s odbroušeným ochranným nátěrem bez známých vad. Tentokrát bylo na rozdíl od předchozího měření využito ruční měřicí sondy v šesti-elektrodovém uspořádání o rozteči 4mm mezi jednotlivými elektrodami a celkovou roztečí 20mm. Cílem tohoto experimentu bylo ověřit chování parametru trhliny A na potrubí bez vad a jeho reakci na přítomnost okraje potrubí.

Na očištěný povrch byla podélně nakreslena měřicí linie s rastrem 10mm. Postupně byly naměřeny body od 0mm do 180mm v intervalu 10mm.

Z výsledků měření vyplývá:

- 1) Měření je ovlivněno změnou geometrie (konec potrubí).
- 2) Parametr trhliny A je pro úsek potrubí o stejném materiálu a geometrii konstantní.



Obr. 38

Graf závislosti parametru trhliny A na vzdálenosti od počátku testovacího potrubí bez známých vad a fotografie z měření. Z experimentu vyplývá vliv přítomnosti okraje potrubí na parametr trhliny A.

4.3 Detekce vnitřních trhlin provozního potrubí pomocí ruční sondy

Tento experiment měl za úkol prokázat schopnost měřicí aparatury detekovat přítomnost trhlin v potrubí a měřit jejich velikost. Pro demonstraci bylo vybráno potrubí z elektrárenského provozu s rozsáhlou bodovou korozí a dlouhými trhlínami na vnitřní straně pláště. Vnější povrch potrubí byl nejprve pomocí brusky zbaven koroze, se kterou si měřicí sonda ani při maximálním přitlačení nebyla schopna poradit, a následně dobroušen brusným papírem. Na upravený povrch byla naznačena linie vnitřních trhlin s rastrem 10mm. Měření bylo realizováno přikládáním ruční sondy kolmo k linii trhlin s krokem 10mm (Obr. 39). Naměřené hodnoty byly zpracovány a vizualizovány v programu Microsoft Excel 2010.



Obr. 39

Přikládání měřicí sondy k zapůjčenému provoznímu potrubí s vnitřními trhlinami iniciovanými bodovou korozí.



Obr. 40

Přenesená linie trhlin s 10mm rastrem na vnější stranu očištěného provozního potrubí.



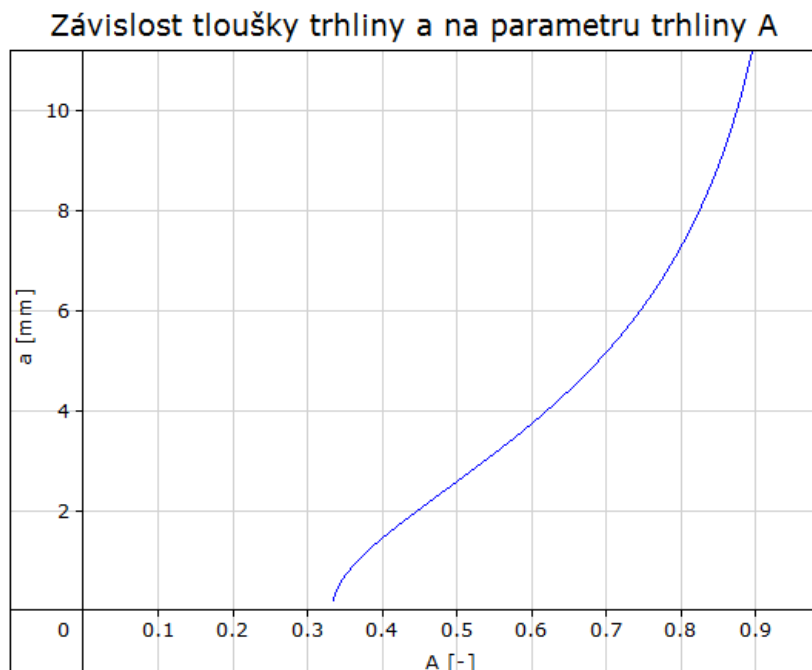
Obr. 41

Vliv koroze a vnitřních trhlin na velikost parametru trhliny A. V rozsazích 10mm až 50mm a 120mm až 140mm je znatelný úbytek materiálu vlivem bodové koroze. V rozsahu 70mm až 105mm je hloubková koroze propojená hlubokou trhlinou.

Z naměřených dat je patrná indikace míst s úbytky materiálu vlivem koroze i vnitřních trhlin. Na rozdíl od předchozího měření byla kritická místa indikována výrazným zvětšením parametru trhliny A, což je způsobeno symetricky umístěnými elektrodami přes trhlinu. Této problematice se věnuje kapitola 4.5.

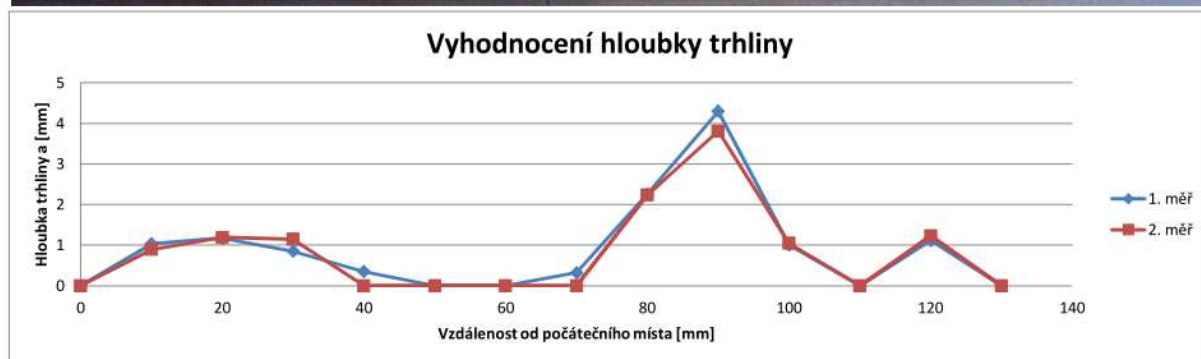
Z vyhodnocených parametrů trhliny A byly vypočítány hloubky trhliny a pro dané elektrodové uspořádání měřicí sondy. Pokud je parametr A menší než přibližně 3,4, není trhlina detekována (Obr. 42).

Tloušťka stěny testovaného potrubí t je 4,2mm. Odchytky mezi skutečnou a vyhodnocenou hloubkou trhlín vyplývají z předpokladů pro výpočet, kdy skutečná hloubka trhliny musí být mnohem menší, než tloušťka stěny potrubí t . Dále vztah předpokládá nekonečnou délku trhliny [11].



Obr. 42

Funkční závislost tloušťky trhliny a v závislosti na parametru trhliny A pro danou konstrukci měřicí sondy dle Korcova vztahu [11].



Obr. 43

Velikost vyhodnocené hloubky trhliny a . V rozsazích 10mm až 50mm a 120mm až 140mm je znatelný úbytek materiálu vlivem bodové koroze s reálnou hloubkou průměrně 1.1mm. V rozsahu 70mm až 105mm je hloubková koroze propojená trhlinou, jejíž skutečná hloubka je odhadována na 4mm.

4.4 Detekce vnitřních trhlin testovacího potrubí pomocí ruční sondy

Měření bylo provedeno stejným postupem jako v předchozím případě avšak tentokrát na testovacím potrubí s uměle vyjiskřenými vnitřními trhlinami o známých parametrech. Povrch potrubí nebyl při prvním měření upraven. Kvůli eliminaci problémů s přechodovými odpory mezi elektrodami sondy a povrchem potrubí byl při druhém měření povrch lehce obroušen brusným papírem. Výsledky z měření byly vyhodnoceny a vizualizovány v programu Microsoft Excel 2010.



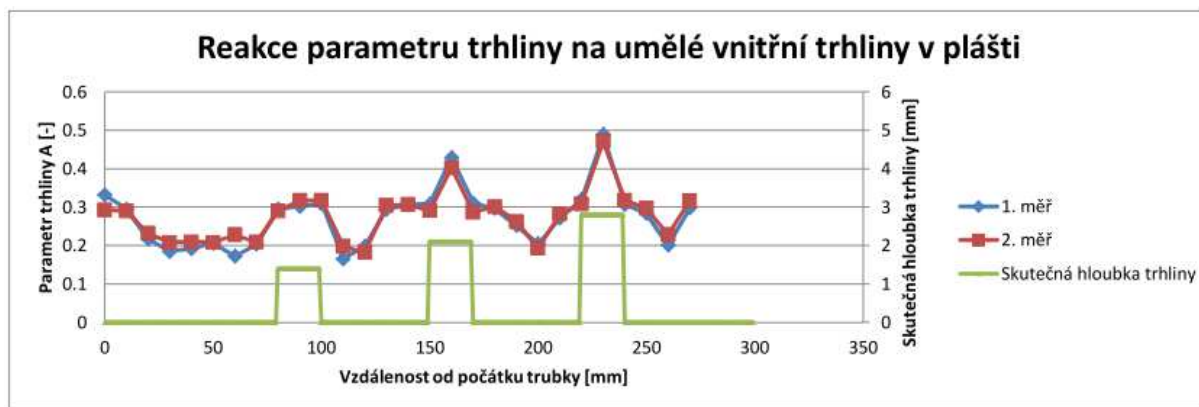
Obr. 44

Průběh měření na testovací potrubí s umělými trhlinami známých parametrů.



Obr. 45

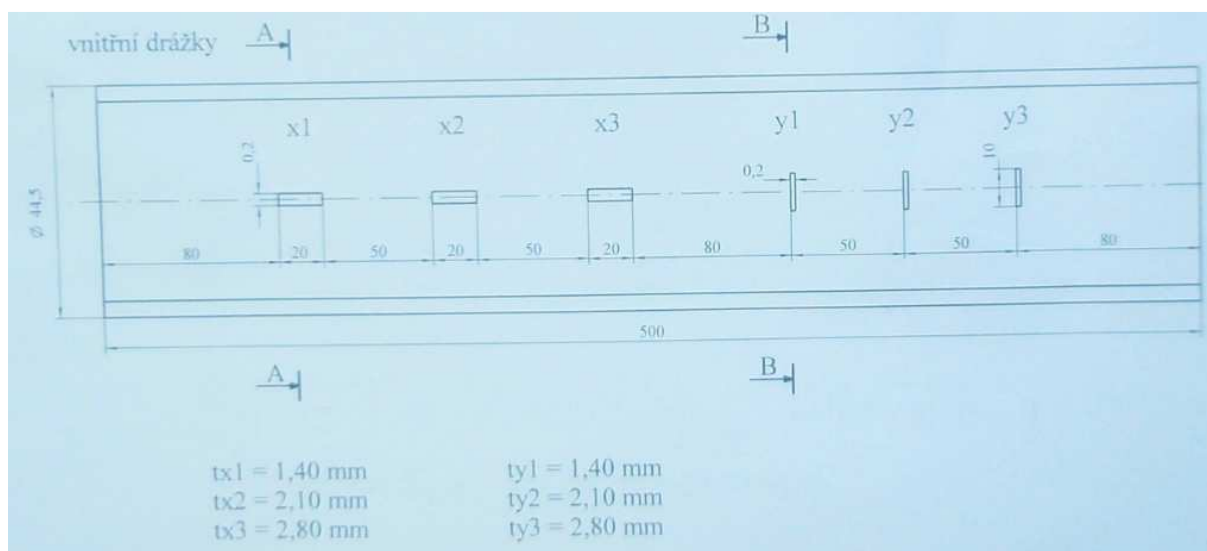
Detail vyjiskřených trhlín o známých parametrech na vnitřní straně testovacího potrubí.



Obr. 46

Graf závislosti velikosti parametru trhliny A na hloubce umělých trhlín v testovacím potrubí. Jasně zřetelné trhliny x1, x2 a x3 (Obr. 47). Počáteční výchylka je dána ovlivněním od levého konce potrubí.

*Pozor na rozdílné osy y pro skutečnou hloubku trhliny a parametr trhliny!

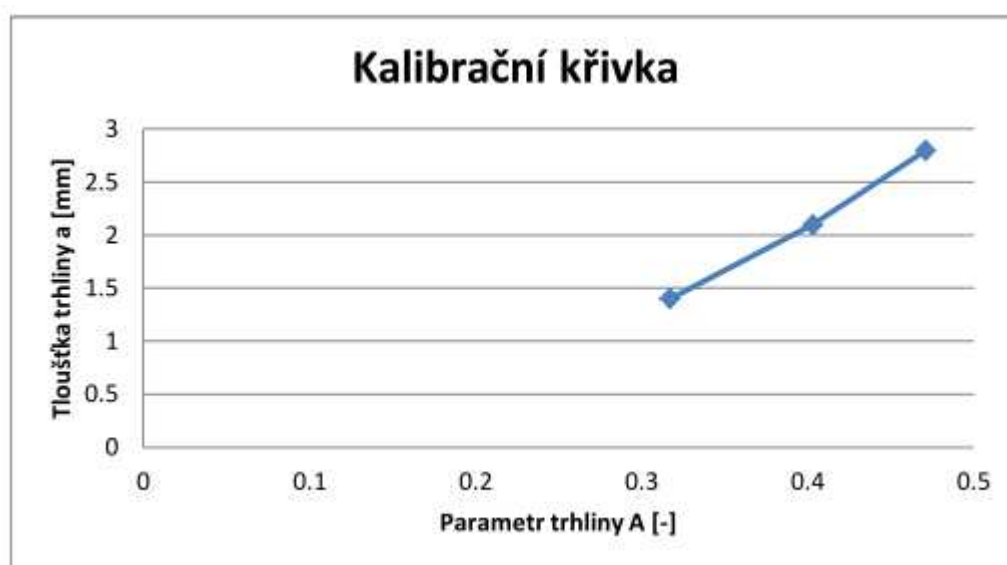


Obr. 47

Výkres testovacího potrubí s vyjiskřenými umělými trhlinami.

Vyhodnocení hloubek jednotlivých trhlin na základě Korcova vztahu v tomto případě nemělo smysl, neboť při dané konstrukci ruční měřicí sondy bylo ovlivnění, způsobené konečnou délkou trhliny, příliš velké. Této problematice je více věnována kapitola 4.5.

Na základě tohoto měření lze stanovit kalibrační křivku závislosti hloubky trhliny na velikosti parametru trhliny A. Tato křivka platí pouze pro konkrétní typ trubky, měření na středu trhliny o délce 20 mm a pro konkrétní typ měřicí sondy.



Obr. 48

Kalibrační křivka pro zjištění hloubky trhliny v závislosti na parametru trhliny A.

4.5 Vliv obecného umístění sondy vůči trhlíně

Pro účely lepšího pochopení reakcí měření na trhlínu byla provedena série měření s obecným umístěním ruční měřicí sondy vůči trhlíně a provedeno vyhodnocení.



Obr. 49

Testovací místo pro testování obecného umístění měřicí sondy vůči trhlíně nad nejhlubší trhlinou provozního potrubí.

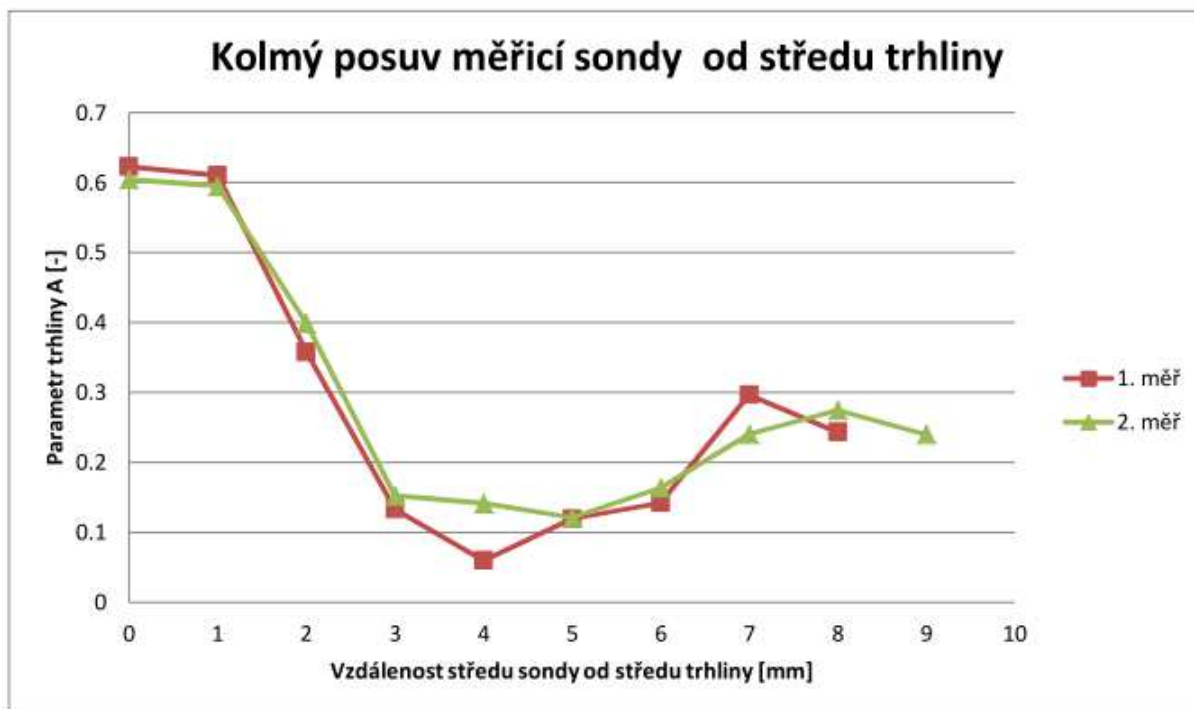
4.5.1 Posuv kolmo umístěné sondy kolmo od středu trhliny

Při tomto experimentu byla měřicí sonda umístěna kolmo k trhlíně, střed sondy na střed trhliny. Následně byla sonda s milimetrovým krokem posouvána kolmo od středu trhliny tak, že jednotlivé elektrody přecházely postupně na jednu její stranu. Pro každý krok byl zaznamenán parametr trhliny A .

Z tohoto měření vyplývají následující poznatky:

- 1) Pokud je trhlina mezi vnitřními měřicími elektrodami, parametr trhliny A oproti referenčnímu místu bez vad vzroste (Obr. 50 – 1mm, 2mm).
- 2) Pokud jsou obě vnitřní měřicí elektrody na stejné straně trhliny, parametr A oproti referenčnímu místu bez vad klesne (Obr. 50 – 3mm až 6mm).

- 3) Pokud jsou oba páry měřicích elektrod na jedné straně trhliny a pouze jedna proudová elektroda na straně druhé, detekce trhliny není prokazatelná (Obr. 50 – 7mm až 9mm).



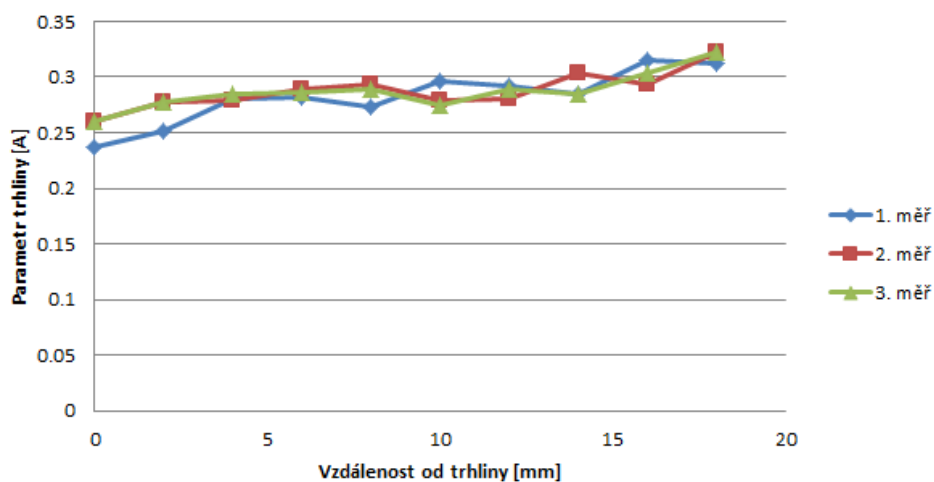
Obr. 50

Vliv vyhodnoceného parametru trhliny A při kolmém posuvu kolmo umístěné sondy směrem od trhliny. Parametr trhliny pro referenční místo bez vad je přibližně 0.3.

4.5.2 Posuv paralelně umístěné sondy kolmo od trhliny

Tento experiment měl za úkol demonstrovat vliv paralelních trhlin k měřicí sondě. Měření bylo provedeno umístěním sondy paralelně přímo na trhlínu a následně oddalováním s krokem 1mm. Při každém kroku byl zaznamenán parametr trhliny A . Z experimentu vyplývá, že přibližně ve vzdálenosti 10mm sondy od paralelní trhliny nedochází k ovlivnění měření. Tato vzdálenost je závislá na geometrii sondy a bude přímo úměrná rozteči proudových elektrod.

Posuv měřicí sondy (umístěné paralelně k trhlíně) kolmo od středu trhliny



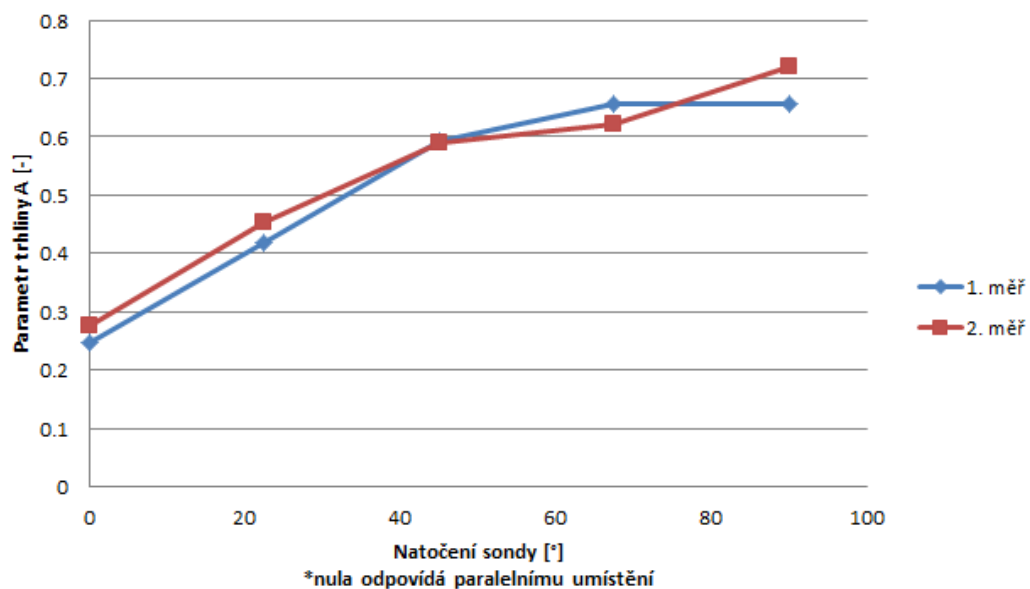
Obr. 51

Vliv posuvu paralelně umístěné sondy vůči trhlíně, kolmo od jejího středu.

4.5.3 Natočení sondy

Experiment s natáčením sondy vůči trhlíně prokázal očekávaný sinusový průběh.

Vliv natočení sondy vůči trhlíně



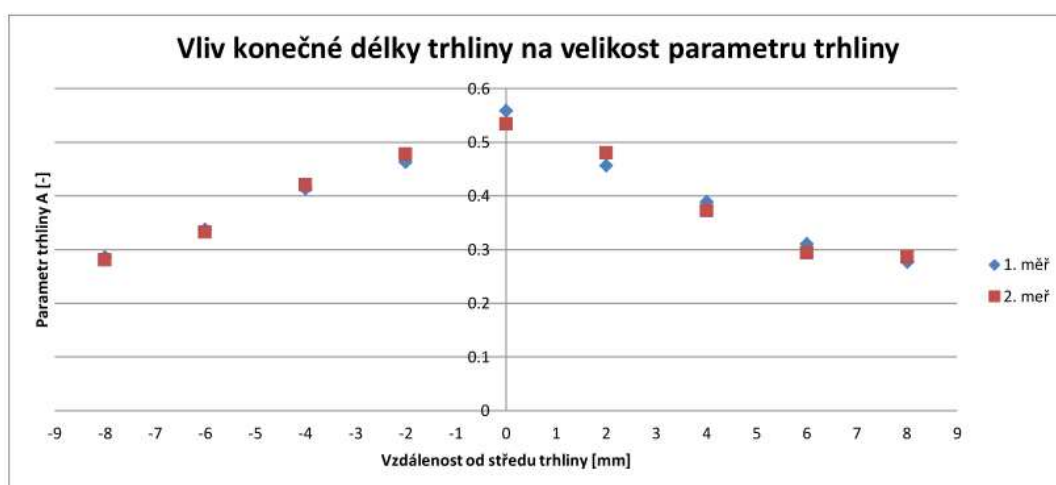
Obr. 52

Vliv natočení sondy vůči trhlíně.

4.5.4 Posuv kolmo umístěné sondy po celé délce trhliny

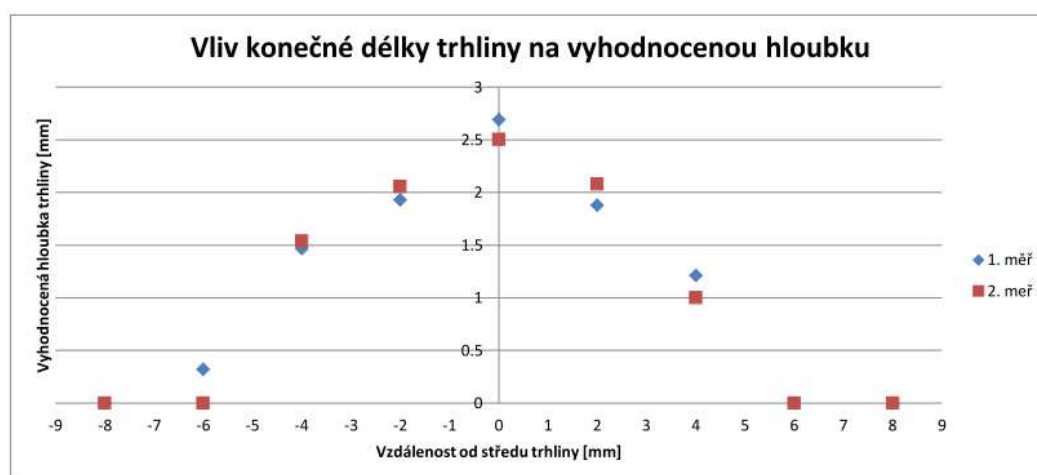
Při tomto měření byla přes trhlinu o délce 20mm a hloubce 3.7mm kolmo a symetricky umístěna měřicí sonda (střed sondy na střed trhliny). S milimetrovým krokem byly následně zaznamenávány hodnoty parametru A při posuvu středu sondy po délce trhliny.

Z experimentu vyplývá, že měření hloubky trhliny je významně ovlivněno jejich konečnou délkou. Pro přesné měření by měla být vzdálenost měřicí sondy od jejího okraje větší než rozteč proudových elektrod sondy.



Obr. 53

Velikost parametru trhliny A v závislosti na umístění měřicí sondy kolmo přes trhlinu v různé vzdálenosti od jejího středu. Z grafu je patrné, že měření trhliny je významně ovlivněno jejich konečnou délkou. Skutečná délka trhliny je 20mm.



Obr. 54

Vypočtené hloubky trhliny a pro stejné měření jako předchozí graf. Skutečná tloušťka trhliny je 3.7mm.

4.6 Zhodnocení testů

Provozní testy aparatury byly navrženy a provedeny s motivací dokázat její funkčnost a získat znalosti o jejích reakcích na přítomnost obecných trhlin.

Na základě testování na třech různých typech potrubí bylo zjištěno, že pro detekci trhlin v materiálu je aparatura velice citlivá a spolehlivá. Každé měření snímá oblast o obdobném průměru, jako je rozteč vnějších měřicích elektrod sondy. Naproti tomu se vzrůstající velikostí sondy klesá citlivost na malé trhliny a je proto třeba hledat kompromis mezi citlivostí a rychlostí měření (Obr. 37, Obr. 38, Obr. 41, Obr. 46).

Byla provedena série měření s cílem zjistit odezvu aparatury na obecné umístění sondy přes trhlínu. Těchto poznatků může být s výhodou využito při detekci trhlin a jejich přesnější lokalizaci. Byla zjištěna závislost při vzájemném posuvu a natočení trhlíny a sondy. Největší citlivosti detekce trhlíny je dosaženo při jejich vzájemně kolmém postavení a naopak nejmenší citlivost vykazovala aparatura na paralelně umístěné trhlíny. Tyto závěry jsou v souladu s teoretickými předpoklady (Obr. 50, Obr. 51, Obr. 52, Obr. 53).

Na základě detekce a lokalizace trhlíny lze usuzovat i o její délce, která je rozhodující pro další možnosti analýzy geometrie trhlíny (zejména její hloubky). Bylo zjištěno, že pro přesné měření hloubky trhlíny musí být splněna podmínka, aby vzdálenost proudových elektrod kolmo umístěné měřicí sondy byla menší, než vzdálenost jejího středu od okraje trhlíny. V případě, kdy podmínka splněna není, lze pro konkrétní měřicí sondu a dané potrubí stanovit kalibrační křivku, na základě které lze provést vyhodnocení hloubky detekované trhlíny. V případě, že podmínka splněna je, lze hloubku trhlíny vypočítat dle Korcova vztahu [11].

Při měření se ukázalo, že je aparatura velmi citlivá na přechodové odpory mezi elektrodami a povrchem sledovaného materiálu. Navzdory velmi kvalitnímu provedení kontaktů ruční měřicí sondy, které jsou velice ostré, odpružené relativně tuhými pružinami a pozlacené, se sonda nedokázala spolehlivě dostat skrz různé varianty ochranných laků potrubí. Tyto musely být před měřením odstraněny.

5 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací přístroje pro analýzu vzniku a šíření trhlin Korcovou potenciálovou metodou. Samotnému návrhu přístroje předchází kapitola, zabývající se řešením v oblasti elektromagnetických metod nedestruktivního testování. V této kapitole jsou představeny stejnosměrné a střídavé potenciálové metody a dále Korcova potenciálová metoda, na základě které je následně navržen předmětný přístroj. V této kapitole je také představena metoda vířivých proudů, která je hlavním rivalem potenciálových metod v oboru nedestruktivního testování pomocí elektromagnetických metod.

V další kapitole je představen návrh aparatury. Nejprve jsou analyzovány požadavky na funkčnost aparatury, navrženy jednotlivé testovací a měřicí režimy. Na tuto část navazuje návrh modulárně řešené elektroniky. Samostatná kapitola je věnována konstrukci aparatury, kde je řešena mimo jiné i problematika volby konektorů, jejichž kvalita je zásadní pro opakovatelnost měření. V prvních verzích aparatury například docházelo k zásadnímu ovlivnění měření vibracemi nebo pohybem měřicího kabelu.

Návrh firmware řídicího mikrokontroleru je předmětem další kapitoly, která se věnuje zejména obecně návrhu architektury, uživatelskému rozhraní, komunikaci s PC a obsluze měření Korcovou metodou.

V poslední kapitole je představena hotová aparatura pro detekci a analýzu vzniku trhlin a jsou prováděny provozní testy. První test je proveden přivařením měřicích elektrod na potrubí se známou trhlinou. Závěrem z tohoto testu je, že aparatura byla schopna velice dobře odlišit, ve kterém místě je potrubí poškozené korozí nebo hloubkovou trhlinou. Následující testy již byly provedeny pomocí nově zkonstruované ruční měřicí sondy. Byla zapůjčena testovací potrubí se známými trhlínami a to jak přirozenými, tak uměle vyjiskřenými, na kterých byla dále demonstrována a ověřena schopnost aparatury detekovat přítomnost trhliny i usuzovat o jejich délkách. V případě splnění podmínek pro platnost Korcova vztahu pro výpočet hloubky trhliny lze vypočítat i jejich hloubku. Pokud podmínky splněny nejsou, lze měření hloubky trhlín provést na základě stanovení kalibračních křivek, což bylo ověřeno v kapitole 4.4. Poslední experimenty s měřicí aparaturou se věnovaly obecnému umístění sondy vůči trhlíně. Tyto poznatky mohou být s výhodou aplikovány při detekci neznámých trhlin a materiálových vad.

Cíle práce byly dle mého názoru beze zbytku naplněny a byla navržena, představena a otestována funkční aparatura pro detekci a analýzu vzniku trhlin. S ohledem na využití aparatury v praxi by bylo vhodné pokračovat v práci na vývoji pokročilejších funkcí a zpracování měření přímo v aparatuře. Dalším směrem vývoje může být maximální zjednodušení a minimalizace aparatury s ohledem na online i offline zpracování naměřených dat pomocí obslužného tabletu. Vývoj by měl také pokračovat v oblasti ručních měřicích sond, zejména při minimalizaci přechodových odporů na rozhraní mezi elektrodami a měřeným materiálem. Další rozvoj předpokládám v oblasti sond s automatickým odstraňováním krycích nátěrů s využitím vrtákové geometrie elektrody atd. Dále by měly být experimentálně ověřeny vlivy geometrie měřicí sondy na citlivost, akční rádius atd. Důležité je také stanovit parametry měření zejména s ohledem na online detekci trhlin posuvnou ruční sondou.

Korcova potenciálová metoda má značně široké možnosti uplatnění napříč různými průmyslovými odvětvími, zejména pak s ohledem na zvyšování významu technické diagnostiky v moderních provozech a netroufám si odhadnout, jakého dalšího nasazení se v příštích dekádách dočká. Jsem velmi rád, že mi bylo umožněno zakončit své studium prací na takto zajímavém projektu.

Seznam použité literatury

1. **Sposito, Guiseppe.** Advances in potential drop techniques for non-destructive testing. London : Imperial College London, 2009.
2. **Ing. Ladislav Korec, CSc.** *Měření deformace při tečení materiálu potenciálovou metodou.* Praha : Techlab s.r.o., 2014.
3. **Vrije Universiteit Brussel.** Eddy currents. *Damage testing, prevention and detection in aeronautics.* [Online] 2006. [Citace: 12. 4 2014.] http://mech.vub.ac.be/teaching/info/Damage_testing_prevention_and_detection_in_aeronautics.htm.
4. *DEVELOPMENT OF A DC POTENTIAL DROP SYSTEM CONTROLLED BY COMPUTER.* **R.A. CLÁUDIO, J. MAIA, J.M. DIAS PEREIRA, R. BAPTISTA, C.M. BRANCO, J. BYRNE.** Regua : 9 th PORTUGUESE CONFERENCE ON FRACTURE, 2004.
5. **Giuseppe Sposito, Peter Cawley, Peter B. Nagy.** An approximate model for three-dimensional alternating current potential drop analyses using a commercial finite element code. *NDT&E International.* 2009.
6. **Matelect ltd.** *Practical aspects of the acpd technique.* [User manual] Harefield, UK : Matelect ltd, 2014.
7. **F. Takeo, M. Saka.** *Advancement of the closely coupled probes potential drop technique for NDE of surface cracks.* Hachinohe, Sendai, Japan : Hachinohe National College of Technology, Tohoku University, 2005.
8. **Graz University of Technology.** Resistivity Methods. *Environmental Geophysics .* [Online] U.S. Environmental protection agency, 2011. [Citace: 06. 04 2014.] http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/methods/Surface_Geophysical_Methods/Electrical_Methods/Resistivity_Methods.htm.
9. *Nondestructive measurement of the response of rear-wall flaws in thick-walled structures using dc four-point-probes technique.* **S. Reaz Ahmed, Masumi Saka.** Auckland, New Zealand : Asia-Pacific Conference on NDT, 2006.
10. **J. Dijkstra, W. Broere.** The applicability of soil density measurements using a resistivity probe. Delft, The Netherlands : Geo-Engineering, Delft University of Technology, 2006.
11. **Ing. Ladislav Korec, CSc.** *Odečítací jednotka pro měření potenciálovou metodou Techlab SRT-4K.* Praha : Techlab s.r.o., 2007.
12. **STMicroelectronics.** Getting started with STM32F37x hardware development. *STM32F3xx documentation.* : STMicroelectronics, 2012.
13. **TME Electronic Components.** Konektory M12. [Online] 2014. [Citace: 11. 4 2014.] http://www.tme.eu/cz/katalog/#id_category=112967&page=1&s_field=artykul&s_order=ASC.
14. **Tracer company.** Lithium Polymer Battery Packs. [Online] [Citace: 04. 04 2014.] <http://www.deben.com/lithium-polymer-battery-packs/12v-8ah-lithium-polymer-battery-pack.html>.
15. *Theory of four-point alternating current potential drop measurements on a metal half-space.* **Bowler, Nicola.** Iowa State University : JOURNAL OF PHYSICS D: APPLIED PHYSICS, 2006, Sv. 39.
16. **GM Electronics.** Grafické LCD displeje s řadičem - monochromatické. [Online] [Citace: 12. 4 2014.] <http://www.gme.cz/lcd-graficky-displej-winstar-wg12864a-yyh-v-a-p513-245>.